Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
Online ISSN: 1531-2783 Print ISSN: 5970-2423

Lagged correlation analysis of drought propagation from meteorological to hydrological systems: A case study of the Damghan Watershed

Mahin Khosravi[1], Mohammad Reza Yazdani[*2]

[1] Post Doctorate Researcher, Department of Combat Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran, Email, ma.khosravi@semnan.ac.ir
[2] Associate Professor, Department of Combat Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran, Email, m_yazdani@semnan.ac.ir

ARTICLE INFO.

Article type:
Research Paper

Article history
Received: 16 February 2026
Revised: 04 April 2026
Accepted: 18 April 2025
Published online: 20 May 2026

Keywords:
Drought, Management, Multi-scale Analysis RDI index, SDI index

ABSTRACT

Drought, as a dynamic, multiscalar, and propagating phenomenon, typically initiates as meteorological drought in arid and semi-arid regions and, after a distinct time lag, evolves into hydrological drought. However, many previous studies have examined this relationship synchronously, without fully elucidating the role of temporal lag. This study aims to analyze the temporal pattern and propagation of drought in the Damghan region, with particular emphasis on identifying the delayed response of the hydrological system to precipitation deficits. To this end, the reconnaissance drought index (RDI) was calculated at 1-, 3-, 6-, 12-, and 24-month timescales, while the streamflow drought index (SDI) was derived from surface runoff data. Lagged correlation analysis was employed to investigate the temporal linkage between meteorological and hydrological droughts, and drought trends were assessed using the non-parametric Mann–Kendall test and Sen's slope estimator. The results indicate that the strongest correlation between meteorological and hydrological drought occurs at a three-month lag ($r = 0.71$, $p < 0.001$), highlighting the presence of hydrological memory and a delayed streamflow response to reduced precipitation. Moreover, SDI exhibited greater variability than RDI at short-term timescales, whereas a more persistent pattern of hydrological drought emerged at longer timescales. By explicitly focusing on lag-time analysis, this study provides, for the first time, a quantitative framework for explaining the propagation of meteorological drought into hydrological drought in the Damghan region. The findings address a critical gap in studies relying on synchronous drought analysis and offer a scientific basis for effective drought monitoring and sustainable water resources management in semi-arid regions.
p in studies relying on synchronous drought analysis and offer a scientific basis for effective drought monitoring and sustainable water resources management in semi-arid regions.

Citation: Khosravi, M., & Yazdani, M.R. (2026). Lagged correlation analysis of drought propagation from meteorological to hydrological systems: A case study of the Damghan Watershed. *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 14(1), 1-18.

DOR:

Publisher: Iranian Rainwater Catchment Systems Association
© Author(s)

***Corresponding author:** Mohammad Reza Yazdani
Address: Department of Combat Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran.
Tel: +989131078249
Email: m_yazdani@semnan.ac.ir

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
Online ISSN: 1531-2783 Print ISSN: 5970-2423

Lagged correlation analysis of drought propagation from meteorological to hydrological systems: A case study of the Damghan Watershed

Mahin Khosravi[1], Mohammad Reza Yazdani[*2]

[1] Post Doctorate Researcher, Department of Combat Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran, Email, ma.khosravi@semnan.ac.ir
[2] Associate Professor, Department of Combat Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran, Email, m_yazdani@semnan.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Drought is a gradual, multi-stage phenomenon in the hydrological cycle, beginning with precipitation deficits and, after a certain time lag, leading to reductions in surface runoff and groundwater resources. Despite the importance of this temporal lag, many studies have examined the relationship between meteorological and hydrological droughts without considering system response delays. Drought monitoring using standard indicators is a tool for sustainable water resource management and adaptation to climate change. The reconnaissance drought index (RDI) has a special place in drought studies due to its quantitative calculation, comparability in different assessments, and use of long-term data. The RDI enables multi-scale drought analysis by allowing it to be used in different periods of short-term droughts (RDI-3 – RDI-1), medium-term droughts (RDI-6), and long-term droughts (RDI-12 – RDI-24). Another standard indicator for assessing water scarcity in various studies is the stream drought index (SDI). Recent studies show that the intensity and timing of drought transitions are strongly dependent on climatic characteristics, watershed physical conditions, water storage capacity, and timing of the indices. In particular, hydrological systems typically respond with a time lag of several months, reflecting the role of cumulative storage such as infiltration, soil, and recharge aquifers. This study aims to quantify the time lag in drought propagation from meteorological to hydrological systems in the Damghan Watershed and to identify the dominant response delay of river flow to precipitation deficits.

Methodology: The Damghan Watershed, covering approximately 13,000 km², is located in a semi-arid climate, with annual rainfall ranging from 160 to 446 mm and elevations between 1281 and 3744 m. The climatic, hydrological, and geological characteristics have made Damghan Watershed a suitable example for analyzing the multiscale behavior of meteorological and hydrological droughts and examining the response of groundwater systems to climate change. Monthly precipitation and streamflow data from 1990 to 2020 were analyzed, and data quality was controlled using statistical tests (Grubbs test at 95% confidence). Meteorological drought was assessed using the RDI, while hydrological drought was evaluated using the SDI at 1-, 3-, 6-, 12-, and 24-month timescales. Standardized RDI and SDI series were calculated for multiple timescales to capture temporal variations in drought conditions. Pearson correlation analysis was applied to evaluate the relationship between meteorological and hydrological droughts, and lagged correlation analysis was performed to identify the dominant response delay of river flow to precipitation deficits. Long-term trends and changes in drought severity were assessed using the Mann-Kendall test and Sen's slope estimator, while aggregation of indices over different timescales (1–24 months) was conducted to examine the effect of temporal scale on drought propagation and the cumulative behavior of the system.

Results and Discussion: Pearson correlation analysis between standardized RDI and SDI for 2008–2018 (120 months) showed a moderate concurrent correlation (Lag 0, $r \approx 0.48$ at the 3-month scale), while lagged correlation peaked at a three-month delay ($r = 0.71$, $p < 0.001$), indicating a three-month hydrological memory in the system. Short-term scales (1–3 months) exhibited high variability in SDI (+2.1 to −2.4) and RDI (+1.8 to −2.0), whereas long-term scales (12–24 months) were more stable, with severe droughts (SDI < −1.5) persisting longer. Mann-Kendall and Sen's slope analyses revealed a significant decline in wet conditions and an increasing frequency of moderate to severe droughts at the 24-month scale. Scale analysis further showed that correlation generally increased with aggregation period, but the three-month lag consistently displayed the highest correlation, highlighting its key role in water stress propagation. These results indicate that the Damghan

***Corresponding author:** Mohammad Reza Yazdani
Address: Department of Combat Desertification, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran.
Tel: +989131078249
Email: m_yazdani@semnan.ac.ir

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

ISSN (Online): 2783-1531 - ISSN (Print): 2423-5970

Watershed requires approximately three months to convert a meteorological drought signal into reduced surface runoff, a lag influenced by soil moisture storage, infiltration, aquifer recharge, and the region's geological structure. Overall, the findings suggest that drought is not an instantaneous event but a cumulative, time-dependent process, with maximum intensity transfer at medium-term scales, and understanding this delay can enhance early warning systems as well as guide water resource planning and reservoir management.

Conclusion: By integrating multi-scale drought index analysis with lagged correlation assessment, this study provides a quantitative framework to understand the temporal propagation of drought. The identification of a dominant three-month response delay highlights the watershed's hydrological memory and can improve river flow forecasting, supporting climate-adaptive water management policies in semi-arid regions. Despite the significant results, it should be noted that the hydrological drought analysis in this study was based on data from a single hydrometric station; therefore, the findings related to SDI are not representative of the behavior of the entire Damghan Watershed and their generalization to the entire region should be done with caution. However, the analytical framework presented in this study, especially the use of time-lag correlation analysis, has the potential to be applied to other watersheds and similar studies. Overall, this study, focusing on time-lag analysis, provides a quantitative framework for explaining the transition from meteorological drought to hydrological drought, which can help improve drought monitoring, better understand the response of hydrological systems, and support decision-making in water resources management in semi-arid regions. It is suggested that future research, by utilizing data from multiple hydrometric stations and conducting spatial analyses, will enhance the generalizability of the results and provide a more comprehensive picture of hydrological drought behavior at the basin level.

Ethical Considerations

Data availability statement: The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Funding: This research was financially supported by Semnan University under the postdoctoral project number 20905.

Authors' contribution: **Khosravi, M.:** Conceptualization, conducting software/statistical analyses, drafting the initial version of the manuscript; **Yazdani, M.R:** Supervision, editing, and reviewing the manuscript.

Conflicts of interest: The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Acknowledgment: We would like to express our sincere gratitude to Semnan University for the financial and logistical support of the research project, which played a significant role in advancing this study under contract number 20905.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
مجله علمی سامانه‌های سطوح آبگیر باران ایران
شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۱۵۳۱ شاپا چاپی: ۲۴۲۳-۵۹۷۰

تحلیل انتقال زمانی خشکسالی از سامانه‌های هواشناسی به هیدرولوژیکی با استفاده از همبستگی تاخیری: مطالعه موردی حوضه دامغان

مهین خسروی [۱]، محمدرضا یزدانی [۲*]

[۱] پژوهشگر پسادکتری، گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ma.khosravi@semnan.ac.ir.
[۲] دانشیار، گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، m_yazdani@semnan.ac.ir.

مشخصات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخچه مقاله
دریافت: ۲۷ بهمن ۱۴۰۴
بازنگری: ۱۵ فروردین ۱۴۰۵
پذیرش: ۲۹ فروردین ۱۴۰۵
انتشار برخط: ۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:
حوضه دامغان، شاخص شناسایی خشکسالی(RDI)، شاخص خشکسالی جریان(SDI)، مدیریت منابع آب

چکیده

خشکسالی به‌عنوان یک پدیده پویا، چندمقیاسی و انتقالی، در مناطق خشک و نیمه‌خشک معمولاً از خشکسالی هواشناسی آغاز شده و با یک وقفه زمانی مشخص به خشکسالی هیدرولوژیکی منجر می‌شود؛ با این حال، در بسیاری از مطالعات، این رابطه به‌صورت هم‌زمان بررسی شده و نقش وقفه زمانی در پاسخ سامانه‌های هیدرولوژیکی به‌طور کامل تبیین نشده است. هدف این پژوهش، تحلیل الگوی زمانی و فرآیند انتقال خشکسالی از بعد هواشناسی به بعد هیدرولوژیکی در منطقه نیمه‌خشک دامغان، با تأکید بر شناسایی پاسخ تأخیری سامانه هیدرولوژیکی نسبت به کمبود بارش است. بدین منظور، شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه و شاخص خشکسالی جریان (SDI) بر اساس داده‌های دبی جریان سطحی محاسبه شد. به منظور بررسی ارتباط زمانی میان دو نوع خشکسالی، تحلیل همبستگی با وقفه زمانی بین سری‌های زمانی RDI و SDI انجام گرفت و روندهای زمانی خشکسالی با استفاده از آزمون ناپارامتری من–کندال و تخمین‌گر شیب سن ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که بیش‌ترین همبستگی بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در وقفه زمانی سه‌ماهه رخ می‌دهد ($p < 0.001$ ،$r = 0.71$) که بیانگر وجود حافظه هیدرولوژیکی و پاسخ تأخیری جریان رودخانه به کاهش بارش است. هم‌چنین، SDI در مقیاس‌های کوتاه‌مدت نوسانات بیش‌تری نسبت به RDI نشان داد، در حالی‌که در مقیاس‌های بلندمدت، الگوی پایدارتر و تجمعی‌تری از خشکسالی هیدرولوژیکی مشاهده شد که می‌تواند بیانگر فشار مداوم بر منابع آب سطحی و زیرزمینی باشد. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که در نظر گرفتن وقفه زمانی انتقال خشکسالی می‌تواند نقش مهمی در بهبود سامانه‌های هشدار زودهنگام، برنامه‌ریزی بهره‌برداری از منابع آب و مدیریت سدها و آبخوان‌ها در مناطق نیمه‌خشک ایفا کند. این پژوهش با تمرکز بر تحلیل چندمقیاسی و همبستگی تأخیری، چارچوبی کمی برای تبیین انتقال خشکسالی هواشناسی به خشکسالی هیدرولوژیکی در منطقه دامغان ارائه می‌دهد و می‌تواند به‌عنوان مبنایی علمی برای مدیریت پایدار منابع آب در شرایط تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: خسروی، مهین، یزدانی، محمدرضا (۱۴۰۵). تحلیل انتقال زمانی خشکسالی از سامانه‌های هواشناسی به هیدرولوژیکی با استفاده از همبستگی تاخیری: مطالعه موردی حوضه دامغان. *سامانه‌های سطوح آبگیر باران*، ۱۴(۱)، ۱-۱۸.

DOR:

© نویسندگان

ناشر: انجمن علمی سیستم‌های سطوح آبگیر باران ایران

[۱*] **نویسنده مسئول:** محمدرضا یزدانی
نشانی: گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
تلفن: ۰۹۱۳۱۰۷۸۲۴۹
پست الکترونیکی: m_yazdani@semnan.ac.ir

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

مقدمه

خشکسالی یکی از پیچیده‌ترین بلایای طبیعی است که تأثیرات اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی گسترده‌ای بر جوامع انسانی و سامانه‌های طبیعی دارد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، شدت و تکرار خشکسالی‌ها در دهه‌های اخیر افزایش یافته و پیامدهایی مانند کاهش منابع آب سطحی و زیرزمینی، افت تولیدات کشاورزی، و تشدید مهاجرت‌های روستایی به دنبال داشته است. به‌همین دلیل، خشکسالی پدیده‌ای کلیدی در این مناطق محسوب می‌شود. در دهه‌های اخیر، مطالعات خشکسالی از تحلیل‌های تک‌بعدی مبتنی بر کمبود بارش به‌سمت درک ماهیت زنجیره‌ای، چندمقیاسی و انتقالی خشکسالی تغییر یافته است. پژوهش‌های جدید نشان می‌دهند که خشکسالی یک پدیده ایستا نیست، بلکه فرآیندی پویا است که می‌تواند از خشکسالی هواشناسی آغاز شده و با یک وقفه زمانی مشخص به خشکسالی‌های کشاورزی و هیدرولوژیکی منجر شود (Zhang et al., 2022).

پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های استاندارد، ابزاری حیاتی برای مدیریت پایدار منابع آب و سازگاری با تغییرات اقلیمی است. شاخص شناسایی خشکسالی (RDI)[1] بهدلیل سادگی محاسبه، قابلیت مقایسه در مقیاس‌های زمانی مختلف، و استفاده از داده‌های بلندمدت، جایگاه ویژه‌ای در مطالعات خشکسالی دارد (Tsakiris and Vangelis, 2005). شاخص (RDI) با امکان محاسبه در بازه‌های زمانی مختلف خشکسالی‌های کوتاه‌مدت (RDI-1 – RDI-3)، خشکسالی‌های میان‌مدت (RDI-6)، و خشکسالی‌های بلندمدت (RDI-12 – RDI-24) تحلیل چندمقیاسی خشکسالی را ممکن می‌سازد. (Tsakiris and Vangelis, 2005; Zarch et al., 2011) از دیگر شاخص‌های استاندارد معتبر برای ارزیابی کم‌آبی در مقیاس‌های زمانی مختلف، شاخص خشکسالی جریان (SDI)[2] است (Shamshirband et al., 2020). مطالعات اخیر با استفاده از شاخص‌های استانداردشده مانند SPI[3]، SPEI[4]، SRI[5]، RDI و SDI نشان داده‌اند که شدت و زمان‌بندی انتقال خشکسالی به‌شدت به ویژگی‌های اقلیمی، شرایط فیزیکی حوضه، ظرفیت ذخیره آب، و مقیاس زمانی شاخص‌ها وابسته است (Zhang et al., 2023a). به‌طور خاص، پژوهش‌های انجام‌شده در حوضه‌های نیمه‌خشک و خشک حاکی از آن است که سامانه‌های هیدرولوژیکی معمولاً با یک تأخیر زمانی چندماهه نسبت به کمبود بارش واکنش نشان می‌دهند، که این تأخیر بیانگر نقش فرآیندهای تجمعی نظیر نفوذ، ذخیره خاک، و تغذیه آبخوان‌ها است. (Cristina et al., 2025)

مطالعات بین‌المللی متعددی کارایی این شاخص‌ها را در تحلیل الگوهای مکانی–زمانی خشکسالی تأیید کرده‌اند. برای مثال، Mengistu et al. (2025) در آفریقای جنوبی نشان دادند که شاخص‌های SPI و SPEI روند افزایشی شدت و فراوانی خشکسالی را در مقیاس‌های زمانی مختلف آشکار می‌کنند. (Zeleňáková et al., 2025) در شرق اسلواکی گزارش کردند که اگرچه SPI و RDI در مقیاس‌های کوتاه و میان‌مدت همبستگی بالایی دارند، اما RDI در مقیاس‌های بلندمدت توانایی بیش‌تری در شناسایی زودهنگام خشکسالی‌های پایدار دارد. هم‌چنین، (Qaisrani et al., 2022) در بلوچستان پاکستان نشان دادند که RDI در مقایسه با شاخص‌های مبتنی صرف بر بارش، الگوهای واقعی‌تری از خشکسالی را در مناطق گرم و خشک آشکار می‌سازد. در کنار تحلیل شدت و فراوانی خشکسالی، تمرکز مطالعات اخیر به بررسی زمان تأخیر و رفتار انتقال خشکسالی از بعد هواشناسی به هیدرولوژیکی معطوف شده است. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که پاسخ سامانه‌های هیدرولوژیکی به کمبود بارش معمولاً با تأخیر چندماهه همراه است؛ تأخیری که ناشی از فرآیندهای ذخیره‌سازی رطوبت خاک، رواناب پایه، آب‌های زیرزمینی و هیدرولوژیکی حوضه است. مطالعات انجام‌شده در حوضه رودخانه هایهه چین نشان داده‌اند که با وجود کاهش نسبی شدت خشکسالی هواشناسی در برخی دوره‌ها، خشکسالی‌های هیدرولوژیکی تشدید شده‌اند و یک وقفه زمانی غالب در حدود سه ماه برای انتقال خشکسالی گزارش شده است. این واگرایی بیانگر تأثیر فزاینده فعالیت‌های انسانی بر رژیم جریان و تضعیف رابطه مستقیم بین بارش و رواناب است (Liu et al., 2025). پژوهش‌های مشابه در حوضه‌های جینشا و هان‌جیانگ نیز بر وابستگی مکانی، اقلیمی و ساختاری زمان انتقال خشکسالی تأکید دارند. این مطالعات نشان می‌دهند که ویژگی‌هایی نظیر رژیم اقلیمی، توپوگرافی، نوع کاربری اراضی و وضعیت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی می‌توانند زمان و شدت انتقال خشکسالی را به‌طور معناداری تغییر دهند. افزون بر این، تحلیل‌های چندمقیاسی حاکی از آن است که خشکسالی‌های بلندمدت، اثرات عمیق‌تر و پایدارتر بر سامانه‌های هیدرولوژیکی نسبت به رویدادهای کوتاه‌مدت برجای می‌گذارند (Zhang et al., 2023a; Wang et al., 2024).

[1] Drought Identification Index
[2] Streamflow Drought Index
[3] Standardized Precipitation Index
[4] Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
[5] Standardized Runoff Index

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

در ایران نیز مطالعات متعددی با استفاده از شاخص‌های SPI، RDI و SPEI به بررسی خشکسالی هواشناسی پرداخته‌اند و نقش کلیدی متغیرهای اقلیمی در تشدید خشکسالی را به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأیید کرده‌اند برای مثال، در مطالعاتی در غرب و شمال‌غرب با استفاده از RDI و SPEI نقش کلیدی متغیرهای اقلیمی در برآورد شدت خشکسالی تایید شد (Habibi؛Zarch et al., 2011 et al., 2018). در مطالعه دیگری Ahmadi et al. (2025) گزارش کردند که بیش از ۹۵ درصد ایستگاه‌های مناطق مرکزی همبستگی قابل‌توجه بین خشکسالی هواشناسی SPI وخشکسالی هیدرولوژی SSI در وقفه زمانی بلندمدت (۱۲ ماهه) تجربه کرده‌اند. هم‌چنین، Khosravi and Yazdani (2024) نشان دادند که افزایش تداوم خشکسالی هواشناسی منجر به افت منابع آب سطحی و زیرزمینی شده است. با این وجود، بسیاری از این مطالعات یا به تحلیل‌های تک‌مقیاسی محدود بوده‌اند یا فرآیند انتقال خشکسالی را به‌صورت نظام‌مند بررسی نکرده‌اند. از این‌رو، انجام مطالعاتی که بتوانند رفتار زمانی، مقیاس‌محور و انتقالی خشکسالی را به‌صورت یکپارچه بررسی کنند، ضرورتی علمی و مدیریتی محسوب می‌شود. پژوهش حاضر با تمرکز بر منطقه نیمه‌خشک دامغان و با به‌کارگیری هم‌زمان RDI و SDI در مقیاس‌های زمانی مختلف، در راستای پر کردن این خلأ پژوهشی و ارائه چارچوبی منسجم برای درک فرآیند انتقال خشکسالی از جو به سامانه‌های هیدرولوژیکی گام برمی‌دارد. نوآوری و سهم اصلی این پژوهش در تحلیل هم‌زمان و چندمقیاسی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی و در تبیین تفاوت پاسخ سامانه هیدرولوژیکی به کمبود بارش در مقیاس‌های زمانی مختلف نهفته است. این مطالعه با تمرکز بر یک حوضه نیمه‌خشک، تلاش می‌کند شکاف موجود میان تحلیل‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی خشکسالی را کاهش داده و چارچوبی منسجم برای فهم پویایی‌های زمانی و انتقالی خشکسالی ارائه دهد. بر این اساس، اهداف اصلی پژوهش ۱- بررسی رفتار چندمقیاسی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در منطقه نیمه‌خشک دامغان با استفاده از شاخص‌های RDI و SDI در مقیاس‌های زمانی مختلف؛ ۲- تحلیل تفاوت پاسخ سامانه هیدرولوژیکی به خشکسالی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت و تبیین نقش مقیاس زمانی در شدت و تداوم خشکسالی‌ها؛ ۳- مقایسه توان شاخص‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در بازتاب تغییرات اقلیمی و شرایط کم‌آبی منطقه؛ ۴- ارزیابی کارایی تحلیل چندمقیاسی خشکسالی به‌عنوان ابزاری پشتیبان برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی در مناطق نیمه‌خشک است.

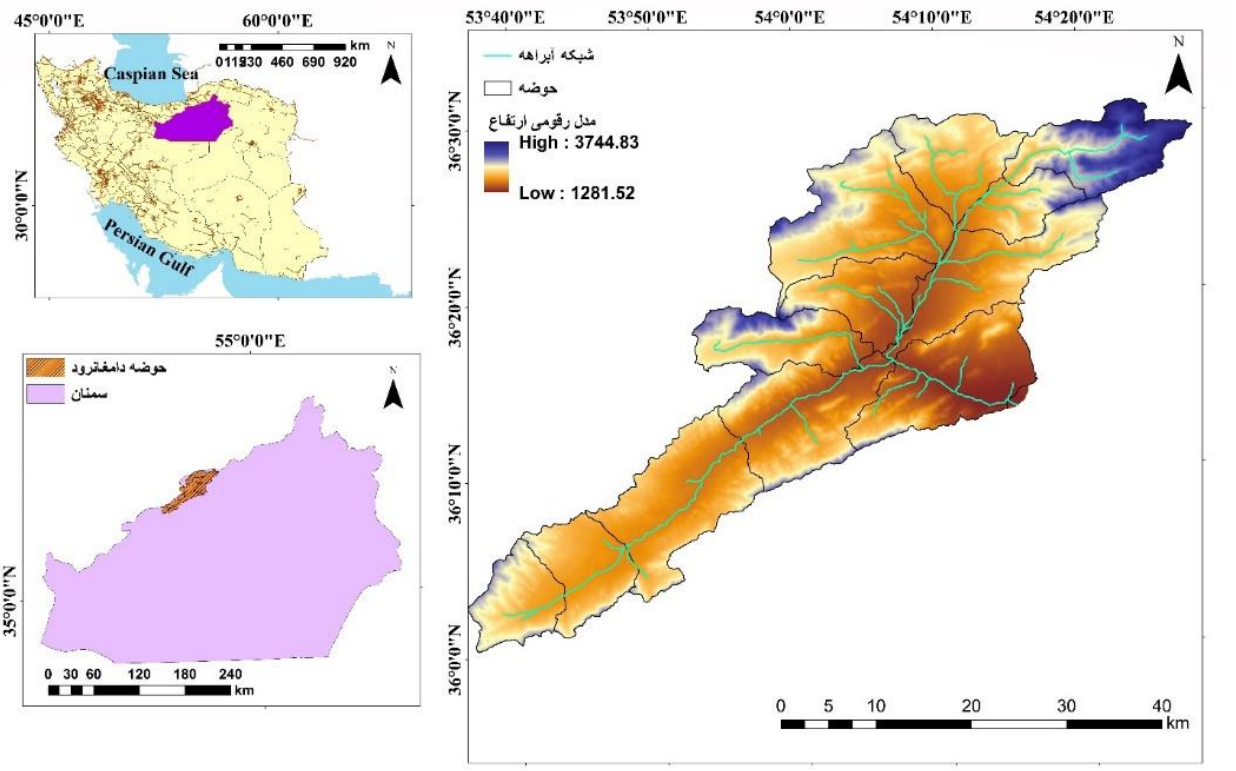
مواد و روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

حوضه مورد مطالعه در شهرستان دامغان، واقع در استان سمنان در بخش مرکزی ایران قرار دارد. این حوضه در محدوده عرض‌های جغرافیایی ۳۶°۲۱′۳۶″ تا ۳۶°۱۸′۴۹″ شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۸°۲۱′۴۸″ تا ۵۸°۲۱′۴۸″ شرقی واقع شده و مساحتی در حدود ۱۳۰۰۰ کیلومتر مربع را دربرمی‌گیرد (شکل ۱). میانگین بارندگی سالانه حوضه بین ۱۶۰ تا ۴۴۶ میلی‌متر متغیر است، در حالی که میانگین دمای سالانه در بازه ۱۶ تا ۲۳ درجه سانتی‌گراد نوسان دارد. دامنه ارتفاعی منطقه از حدود ۱۲۸۱ تا ۳۷۴۴ متر از سطح دریا متغیر بوده و این اختلاف ارتفاع قابل‌توجه، تغییرات مکانی چشمگیری را در الگوی بارندگی و دما ایجاد می‌کند. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، اقلیم منطقه از سرد و خشک در نواحی مرتفع، نیمه خشک سرد تا نیمه‌مرطوب سرد در بخش‌هایی از دامنه‌ها متغیر است. از نظر کاربری اراضی، بخش عمده‌ای از منطقه را اراضی مرتعی با تراکم کم تا متوسط، اراضی بیابانی و دشت‌های کشاورزی محدود تشکیل می‌دهند. سایر کاربری‌ها شامل جنگل‌های تنک و بوته‌زارها در مناطق کوهستانی، اراضی باغی و کشاورزی آبی و دیم در دشت‌های پایین‌دست، و اراضی بایر و سنگلاخی است. در نواحی پست‌تر، فعالیت‌های کشاورزی وابستگی بالایی به منابع آب زیرزمینی دارند و بخش قابل‌توجهی از نیاز آبی از طریق چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق تأمین می‌شود که این امر اهمیت سامانه هیدرولوژیکی حوضه را نسبت به دوره‌های خشکسالی افزایش داده است. از منظر زمین‌شناسی، حوضه در زون ساختاری البرز مرکزی قرار دارد و شامل ترکیبی از سازندهای آبرفتی کواترنری، آهکی، شیل و ماسه‌سنگی است. این تنوع زمین‌شناسی نقش مهمی در کنترل نفوذپذیری، تغذیه آبخوان‌ها و الگوی جریان‌های سطحی و زیرزمینی ایفا می‌کند؛ به‌گونه‌ای که وجود واحدهای کم‌نفوذ در برخی بخش‌ها منجر به افزایش رواناب سطحی و کاهش نفوذ مؤثر شده است. تعامل ویژگی‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی و زمین‌شناختی، دامغان را به نمونه‌ای مناسب برای تحلیل رفتار چندمقیاسی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی و بررسی پاسخ سامانه‌های آب زیرزمینی به تغییرات اقلیمی تبدیل کرده است (Khosravi et al., 2022). در شکل ۱، موقعیت جغرافیایی حوضه دامغان در استان سمنان و کشور ایران نشان داده شده است.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]



شکل ۱ –موقعیت حوضه دامغان در سمنان و ایران

Figure 1- Location of the Damghan Watershed in Semnan, Iran

روش تحقیق

در این پژوهش، به‌منظور بررسی رفتار چندمقیاسی خشکسالی و فرآیند انتقال آن از بعد هواشناسی به بعد هیدرولوژیکی در منطقه نیمه‌خشک دامغان، مراحل تحقیق به‌صورت گام‌به‌گام طراحی و اجرا شد.

گام اول: گردآوری و آماده‌سازی داده‌ها

در نخستین مرحله، داده‌های مورد نیاز شامل داده‌های بارش و دما برای محاسبه شاخص خشکسالی هواشناسی RDI و داده‌های دبی جریان رودخانه برای محاسبه شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی SDI از ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری معتبر واقع در منطقه مورد مطالعه و برای یک دوره آماری بلندمدت گردآوری شد. سپس، به‌منظور اطمینان از کیفیت داده‌ها، کنترل‌های لازم شامل بررسی مقادیر گمشده، شناسایی ناهنجاری‌ها و آزمون یکنواختی سری‌های زمانی انجام گرفت و داده‌ها برای تحلیل‌های بعدی آماده‌سازی شدند.

گام دوم: محاسبه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی

به‌منظور توصیف خشکسالی در ابعاد مختلف، شاخص خشکسالی هواشناسی RDI با درنظرگرفتن هم‌زمان بارش و تبخیر–تعرق پتانسیل، و شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی SDI بر اساس سری زمانی دبی جریان محاسبه شد. این شاخص‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف شامل کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت استخراج شدند تا امکان تحلیل رفتار تجمعی و وابسته به مقیاس خشکسالی فراهم شود.

گام سوم: تحلیل چندمقیاسی رفتار خشکسالی

در این مرحله، تغییرات زمانی، شدت، تداوم و فراوانی خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در مقیاس‌های زمانی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این تحلیل، شناسایی تفاوت پاسخ سامانه هیدرولوژیکی به کمبود بارش در بازه‌های زمانی متفاوت و تبیین نقش مقیاس زمانی در تقویت یا تضعیف خشکسالی هیدرولوژیکی بود.

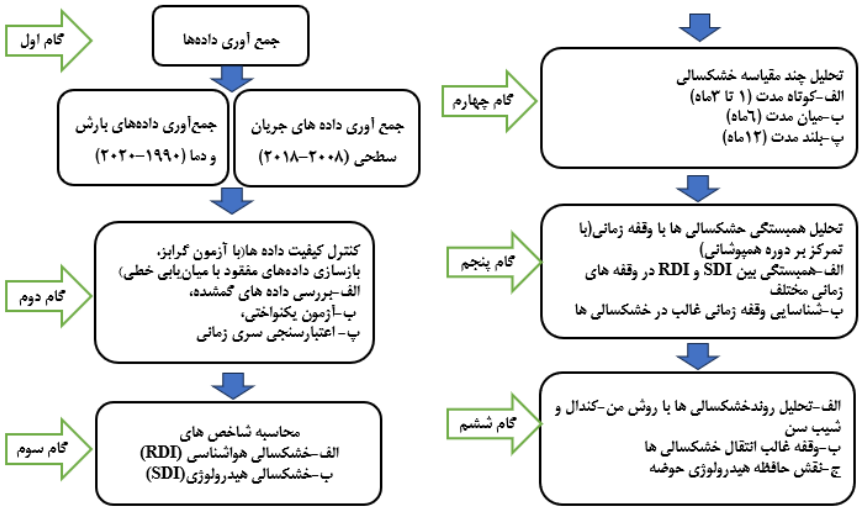
گام چهارم: تحلیل همبستگی با وقفه زمانی (Lagged Correlation Analysis)

به‌منظور بررسی فرآیند انتقال خشکسالی از جو به سامانه‌های هیدرولوژیکی، تحلیل همبستگی با وقفه زمانی بین شاخص‌های RDI و SDI انجام شد. در این تحلیل، ضرایب همبستگی برای وقفه‌های زمانی مختلف محاسبه شد تا زمان انتقال غالب خشکسالی، میزان تأخیر پاسخ هیدرولوژیکی و نقش حافظه هیدرولوژیکی حوضه به‌صورت کمی مشخص شود.

چارچوب کلی تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]



شکل ۲- چارچوب تحقیق

Figure 2- Research framework

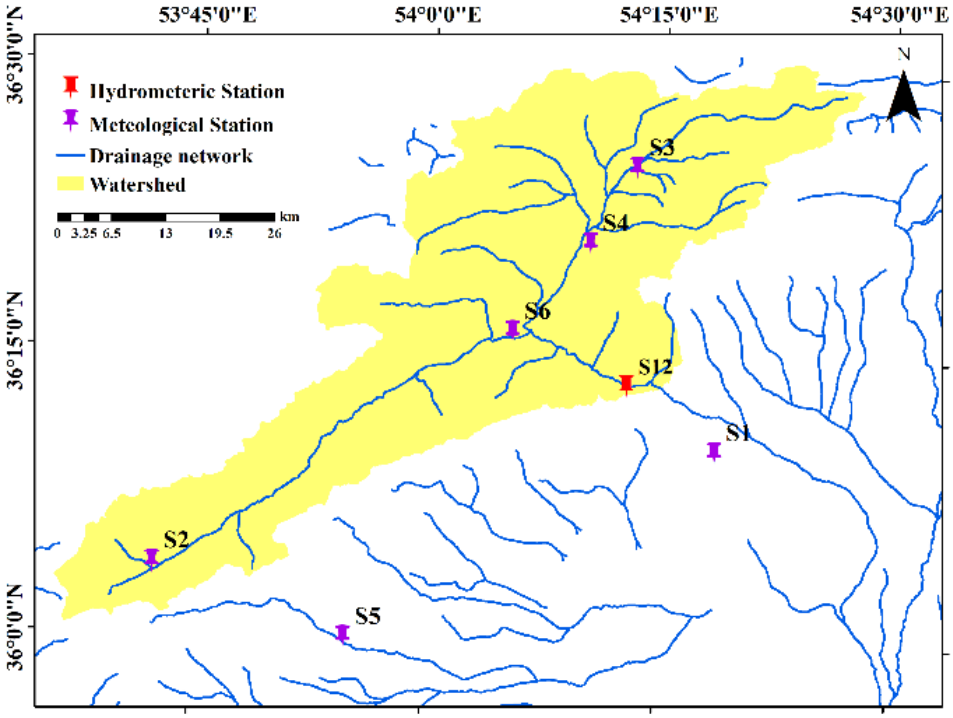
داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیک

داده‌های بارش روزانه مورد استفاده در این مطالعه از سازمان هواشناسی ایران (IRIMO)[1] و شرکت مدیریت منابع آب ایران (WRM)[2] برای دوره ۳۰ ساله (۲۰۲۰—۱۹۹۰) از ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی واقع در حوضه دامغان جمع‌آوری شد. به‌منظور اطمینان از کیفیت و یکنواختی داده‌های هواشناسی (بارش) و هیدرولوژیکی (جریان سطحی)، مجموعه‌ای از آزمون‌های کنترل کیفیت آماری بر روی داده‌ها اعمال شد. داده‌های پرت با استفاده از آزمون گرابز[3] و همگنی سری‌های زمانی داده‌ها با استفاده از آزمون پتیت[4] در سطح اطمینان ۹۵ درصد اعمال شد. داده‌های مفقود با استفاده از روش میان‌یابی خطی و مقایسه هم‌زمان با ایستگاه‌های مجاور بازسازی شد. خلاصه از آزمون‌های کنترل کیفیت داده‌ها در جدول (S1 بخش مواد تکمیلی) ارائه شده است و این فرآیند، قابلیت اتکای آماری داده‌های ورودی برای تحلیل خشکسالی را تضمین می‌کند.

برای انجام تحلیل‌های خشکسالی، سه ایستگاه شامل سینوپتیک دامغان، کلیماتولوژی فولادمحله و چهارده دامغان، به دلیل پیوستگی زمانی مناسب، کیفیت قابل قبول داده‌ها و نزدیکی مکانی به منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند (شکل ۱). این انتخاب با هدف کاهش عدم قطعیت ناشی از کمبود داده و افزایش قابلیت تفسیر نتایج انجام شد. برای بهبود نمایندگی مکانی داده‌های هواشناسی و کاهش عدم قطعیت ناشی از توزیع نامنظم ایستگاه‌ها در منطقه مطالعاتی، میانگین وزنی بارش و دمای روزانه سه ایستگاه منتخب برای محاسبه RDI استفاده شد. برای محاسبه SDI، داده‌های جریان سطحی از ایستگاه‌های هیدرومتری اطراف حوضه مطالعاتی جمع‌آوری شدند. به منظور بهبود یکنواختی و قابلیت اعتماد داده‌های جریان، سری‌های جریان مشابه داده‌های بارش، از نظر آماری پیش‌پردازش شدند. داده‌های جریان سطحی ایستگاه هیدرومتری شهید شاه چراغ واقع در خروجی حوضه به دلیل طول سری زمانی و پیوستگی داده‌ها برای تحلیل بلندمدت خشکسالی هیدرولوژیکی انتخاب شد (شکل ۳). در مرحله بعد، محاسبه شاخص‌های خشکسالی RDI و SDI، انجام گرفت. در این مرحله نرمالسازی داده‌ها صورت گرفت؛ داده‌های بارش بر اساس توزیع گاما و داده‌های جریان بر اساس توزیع نرمال استانداردسازی شدند. تمام مراحل پردازش و آماده‌سازی داده‌ها با نرم‌افزار R و بسته‌های آماری stats و trend انجام شد.

[1] Meteorological data were obtained from the Iran Meteorological Organization (IRIMO)
[2] data were provided by the Iran Water Resources Management Company (IWRMC)
[3] Grubbs' Test
[4] Pettitt

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]



شکل ۳- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی وایستگاه هیدرومتری در حوضه دامغان

Figure 3- Location meteorological and hydrometric stations in the Damghan Watershed

تحلیل چندمقیاسی خشکسالی

مطالعات خشکسالی هواشناسی معمولا نیازمند سری‌های زمانی بلندمدت (حداقل ۳۰ سال) است تا توزیع احتمال بارش و تبخیر–تعرق را به‌طور معتبر برازش دهند و نوسانات اقلیمی بلندمدت را بازنمایی کنند (Zarch et al., 2011; WMO and GWP, 2016) در حالی‌که دارزیابی خشکسالی هیدرولوژیکی مطالعات نشان داده استفاده از SDI درسری‌های زمانی کوتاه‌تر (۱۰–۱۵ سال) نیز عملکرد مناسبی داشته، زیرا محاسبات این شاخص برتغییرات جریان سطحی تجمعی متمرکز است. (Jeong et al., 2024; de Medeiros et al., 2025) از این‌رو، در این مطالعه، برای تحلیل چندمقیاسی خشکسالی، از RDI (بر پایه داده‌های هواشناسی دوره بلندمدت ۱۹۹۰–۲۰۲۰ (۳۱ سال)) و از SDI (بر پایه داده‌های جریان سطحی در دوره ۲۰۰۸–۲۰۱۸ (۱۱ سال)) استفاده شد. تمام تحلیل‌های مقایسه‌ای، از جمله همبستگی معمولی و با وقفه زمانی، منحصراً بر پایه‌ی دوره هم‌پوشانی مشترک (۲۰۰۸–۲۰۱۸) انجام گرفت تا مقایسه‌پذیری نتایج تضمین شود. این رویکرد تفاوت دوره‌های آماری را به حداقل می‌رساند و عدم قطعیت ناشی از آن را کاهش می‌دهد. در جدول تکمیلی S2 همبستگی با تاخیر زمانی SDI در دوره‌های مختلف (۲۰۰۸–۲۰۱۸) نشان داده شده است.

شاخص شناسایی خشکسالی (RDI)

ارزیابی خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص‌های متعددی مانند SPI، SPEI، RDI انجام می‌شود. مطالعات نشان داده است که شاخص‌های استاندارد شده بارش–تبخیرتعرق پتانسیل (SPEI) و RDI از شاخص‌های موثر در ارزیابی خشکسالی هواشناسی هستند. شاخص SPEI با استفاده از روش‌های تورنت وایت[1] و های گریوز[2] تبخیرتعرق پتانسیل[3] (PET) محاسبه می‌کند (Vicente-Serrano et al., 2010)، در حالی‌که، شاخص RDI از روش پنمن–مانتیت–فائو[4] برای محاسبه تبخیرتعرق پتانسیل استفاده می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که در مناطق نیمه‌خشک شاخص RDI به دلیل استفاده از روش پنمن– مانتیت– فائو حساسیت بیش‌تری به تغییرات تبخیرتعرق نشان داده و دقت بالاتری را در برآورد خشکسالی هواشناسی داشته است (Zarei et al., 2021؛ Ortiz-Gómez et al., 2022؛ Tsakiris

[1] Thornthwaite
[2] Hargreaves
[3] Potential Evapotranspiration (PET)
[4] Penman–Monteith-FAO

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

et al., 2007؛ Tsakiris and Vangelis, 2005). از این‌رو، امکان برآورد واقع‌بینانه تبخیر و تعرق پتانسیل و نقش مؤلفه دما را در تحلیل خشکسالی‌های هواشناسی فراهم می‌کند(جدول تکمیلی S3). بنابراین، در این مطالعه از شاخص RDI استفاده شد. داده‌های مورد نیاز در این روش شامل دمای حداقل و حداکثر هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی هستند که از ایستگاه‌های هواشناسی منطقه استخراج شدند. بعد از محاسبه میزان تبخیرتعرق پتانسیل با استفاده از نسبت بارش (P) به تبخیر–تعرق بالقوه شاخص (RDI) برآورد شد. سپس، مقادیر RDI در بازه‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماه محاسبه شدند. برای نرمال‌سازی داده‌ها، از تابع توزیع گاما استفاده و احتمال تجمعی به توزیع نرمال استاندارد تبدیل شد. محاسبه شاخص RDI با استفاده از رابطه (۱) انجام شد.

$$RDI = \frac{\sum_{i=1}^{k} P_i}{\sum_{i=1}^{k} PET_i} \quad (۱)$$

در جایی که P_i میانگین بارندگی ماهانه، فصلی یا سالانه است، PET_i تبخیرتعرق بالقوه ماهانه، فصلی یا سالانه ثبت شده، و k مقیاس زمانی در ماه، فصل یا سال است.

شاخص خشکسالی جریان (SDI)

SDI، به‌عنوان یکی از ساده‌ترین و پرکاربردترین شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی، برای پایش کمبود جریان سطحی استفاده شد (Jahangir and Yarahmadi, 2020؛ Nalbantis and Tsakiris, 2009). این شاخص بر اساس حجم جریان ماهانه محاسبه شده و توانایی ارزیابی کمبود آب در بازه‌های زمانی مختلف را دارد. SDI با رابطه (۲) محاسبه شد.

$$SDI = \frac{Q_i - \bar{Q}}{\sigma} \quad (۲)$$

$\bar{Q}$ میانگین جریان به صورت ماهانه، فصلی یا سالانه است و Q_i جریان به صورت ماه یا فصل و سال، σ انحراف استاندارد جریان است. برای طبقه‌بندی خشکسالی، مقادیر RDI و SDI بر اساس معیارهای (McKee et al., 1993) به هفت سطح تقسیم شدند (جدول ۱).

جدول ۱- طبقه‌بندی آب و هوا بر اساس مقادیر RDI، SDI (مک کی و همکاران، ۱۹۹۳)

Table 1- Climate classification based on RDI, SDI values (McKee et al., 1993)

Index value	Classification of drought
>2	Extremely wet (EW)
1.99-1.5	Very wet (VW)
1.49-1	Moderately wet) MW)
99.0 to- 0.99	Near normal (NN)
-1 to -1.49	Moderate drought (MD)
-1.5 to -1.99	Severe drought (SD)
-2<	Extreme drought (ED)

تحلیل همبستگی الگوی زمانی بین RDI و SDI

این تحلیل با هدف بررسی درجه وابستگی زمانی و مقیاس‌محور دو شاخص و درک بهتر انتقال خشکسالی از جو به سامانه‌های هیدرولوژیکی انجام شد. برای این منظور، داده‌های RDI از سه ایستگاه هواشناسی (S1 دامغان، S2 فولادمحله، S3 چهارده دامغان) و داده‌های SDI از ایستگاه هیدرومتری حوضه استخراج شدند. تحلیل بر مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه و دوره هم‌پوشانی آماری ۲۰۰۸–۲۰۱۸ متمرکز شد تا مقایسه‌پذیری نتایج تضمین شود. برای هر مقیاس زمانی، ۱۲۰ نمونه ماهانه در نظر گرفته شد. پس از پیش‌پردازش، ضریب همبستگی پیرسون بین سری‌های زمانی دو شاخص محاسبه شدند. این رویکرد امکان ارزیابی میزان هم‌زمانی تغییرات هواشناسی و هیدرولوژیکی را فراهم می‌کند و می‌تواند مبنایی برای شناسایی مقیاس‌های زمانی بهینه در پایش خشکسالی باشد.

تحلیل همبستگی با وقفه زمانی بین RDI و SDI

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

به‌منظور درک دقیق‌تر رابطه زمانی و پاسخ تأخیری میان خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی، تحلیل همبستگی با وقفه زمانی (LCA)[1] میان شاخص‌های خشکسالی RDI و SDI انجام شد. از آن‌جا که خشکسالی هیدرولوژیکی معمولاً به‌عنوان پیامد تجمعی و با تأخیر خشکسالی هواشناسی ظاهر می‌شود، بررسی همبستگی هم‌زمان به‌تنهایی برای تبیین رابطه علّی میان این دو نوع خشکسالی کافی نیست. بنابراین، به‌منظور شناسایی تأخیر زمانی پاسخ سامانه هیدرولوژیکی به نوسانات بارش، همبستگی شاخص RDI با مقادیر SDI در وقفه‌های زمانی مختلف محاسبه شد. در این مطالعه، ضرایب همبستگی پیرسون بین سری‌های زمانی استانداردشده RDI و SDI برای وقفه‌های زمان صفر تا شش ماه محاسبه شد. به این صورت که در هر گام، سری زمانی RDI نسبت به SDI به اندازه یک ماه جابه‌جا شده و ضریب همبستگی متناظر محاسبه شد. این فرآیند امکان شناسایی بیشینه همبستگی و تعیین وقفه زمانی غالب بین وقوع خشکسالی هواشناسی و پاسخ هیدرولوژیکی سامانه را فراهم می‌کند. معناداری آماری ضرایب همبستگی با استفاده از آزمون t در سطح اطمینان ۹۵ درصد ارزیابی شد و مقادیر p-value متناظر برای هر وقفه زمانی گزارش شد. نتایج این تحلیل، علاوه بر تبیین ساختار زمانی انتقال خشکسالی از مؤلفه هواشناسی به هیدرولوژیکی، مبنایی علمی برای مقایسه رفتار شاخص‌های RDI و SDI در مقیاس‌های زمانی مختلف فراهم می‌کند. تحلیل همبستگی با وقفه زمانی نقش مهمی در افزایش دقت تفسیر نتایج خشکسالی، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک، ایفا می‌کند.

تحلیل روند الگوی زمانی خشکسالی

الف- روش آزمون من کندال

به‌منظور بررسی روند تغییرات زمانی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی RDI و هیدرولوژیکی SDI در مقیاس‌های زمانی مختلف، از آزمون ناپارامتری من–کندال (Mann–Kendall) استفاده شد. این آزمون به دلیل عدم نیاز به توزیع نرمال داده‌ها و مقاومت در برابر داده‌های پرت، برای تحلیل سری‌های زمانی هیدرولوژیکی و اقلیمی مناسب است. معنی‌داری روندها در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($\alpha = 0.05$) ارزیابی شد. هم‌چنین، برای تعیین شدت و نرخ تغییرات روند، از برآوردگر شیب سن (Sen's slope estimator) استفاده شد که امکان مقایسه کمی روندها را در مقیاس‌های زمانی مختلف فراهم می‌کند. آماره آزمون با استفاده از رابطه‌های (۳) تا (۷) محاسبه می‌شود و در صورتی که مقدار نرمال‌شده Zc بزرگ‌تر از مقدار بحرانی در سطح اطمینان تعیین‌شده باشد، فرضیه صفر (عدم وجود روند) رد شده و وجود روند معنادار تأیید می‌شود.

در این محاسبه، سری زمانی xi از i = 1 ،i = 1 ... n-1، و X j از j = i + 1 ... n است.

آمار آزمون نرمال شده با معادله زیر محاسبه می شود:

آمار آزمون Zc و وقتی | Zc| است Z1-α/2> ، که در آن Z1-α/2 متغیرهای نرمال استاندارد و α اهمیت است. سطح برای آزمون، H0 رد خواهد شد. میزان روند به صورت زیر آورده شده است.جایی که m و ki به ترتیب نشان دهنده مقدار سری های زمانی RDI، SDI و پیوندهای بین سری های زمانی نمونه هستند (Pingale et al.,2016) .

ب- روش تخمین‌گر شیب سن

برای برآورد بزرگی روند، از تخمین‌گر شیب سن استفاده شد که در مقایسه با رگرسیون خطی کلاسیک، روشی مقاوم‌تر در برابر داده‌های پرت محسوب می‌شود (Sen, 1968). در این روش، شیب بین تمام جفت داده‌ها محاسبه شده و میانه مقادیر به‌عنوان شیب نهایی (Qmed) در نظر گرفته می‌شود. علامت این مقدار جهت روند (افزایشی یا کاهشی) و مقدار آن شدت روند را مشخص می‌کند.

برای هر جفت مشاهدات، (X_{ii}, t) و ، (X_{ii}, t) با i< j

سپس شیب سن (Qmed) به صورت میانه Q_{ii}ها محاسبه می‌شود:

$$Qmed = median\ Q_{ij},\ \forall\ n \geq j > i \geq$$

اگر Qmed>0 روند افزایش، اگر Qmed<0 روند کاهشی Qmed=0 روند معنا داری وجود ندارد.

در این مطالعه، با بهره‌گیری از شاخص‌های RDI و SDI روندهای زمانی بارش و رواناب بررسی شد. به‌کارگیری ترکیب آزمون MK[2] و تخمین‌گر شیب سن امکان تحلیل دقیق هم معناداری روند و هم بزرگی تغییرات را فراهم ساخت. تحلیل روند با آزمون من–کندال و شیب سن در R با استفاده از بسته‌های مرتب من–کندال و شیب خط سن انجام شد.

[1] Lag Correlation Analysis
[2] Mann-Kendall Test

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

نتایج و بحث

شدت خشکسالی در ایستگاه‌های هواشناسی حوضه

در ایستگاه (S1 دامغان)، مقادیر منفی شاخص RDI بیانگر وقوع خشکسالی‌هایی با شدت و تداوم متفاوت در مقیاس‌های زمانی مختلف است. به‌طور مشخص، در سال ۱۹۹۳ مقدار RDI-3 حدود ۲/۶۱- یک خشکسالی کوتاه‌مدت و شدید را نشان داد که می‌تواند ناشی از کاهش ناگهانی بارش فصلی باشد. در مقابل، در سال ۲۰۱۳ مقدار RDI-12 با حدود ۲/۵۴- نشاندهنده‌ی یک خشکسالی بلندمدت و پایدار است که می‌تواند پیامدهای بالقوه بر منابع آب زیرزمینی داشته باشد (جدول ۲ و شکل ۴). هم‌چنین در سال ۲۰۱۴، هم‌زمانی مقادیر منفی شاخص RDI در چند مقیاس زمانی (RDI-1، RDI-6 و RDI-12) مشاهده شد که می‌تواند تداوم شرایط خشک و عدم بازیابی مؤثر ذخایر آبی را نشان دهد (جدول ۲)،که بیانگر تشدید اثرات خشکسالی و افزایش احتمال انتقال آن به مؤلفه‌های هیدرولوژیکی است. این نتایج هم‌راستا با مطالعات انجام‌شده در حوضه‌های نیمه‌خشک ایران و سایر مناطق خشک است، که تایید می‌کنند تداوم خشکسالی در چندین مقیاس زمانی، اثرات عمیقی بر منابع آب و بخش کشاورزی برجای می‌گذارند (Vicente-Serrano and López-Moreno, 2005؛ Cammalleri et al., 2019؛ Adib et al., 2024).

در ایستگاه S2 (فولادمحله)، تحلیل مقادیر حدی شاخص RDI وقوع دو دوره خشکسالی شدید را در مقیاس‌های زمانی کوتاه و فصلی نشان داد (جدول ۲ و شکل ۴). در سال‌های ۱۹۹۳، با مقدار RDI-3 حدود ۲/۱۱- و ۲۰۱۳، با مقدار RDI-1 حدود ۲/۱۲- خشکسالی شدید مشاهده شد که نشان می‌دهد شاخص خشکسالی هواشناسی RDI در مقیاس‌های کوتاه‌مدت حساسیت بالایی به نوسانات سریع بارش داشته و می‌توانند نقش مؤثری در سامانه‌های هشدار سریع خشکسالی ایفا کنند؛ این یافته‌ها با نتایج مطالعات پیشین همخوانی دارد (Zhang et al., 2023b؛ Mishra and Singh, 2010).

بررسی شاخص RDI در ایستگاه S3 (چهارده دامغان) نیز بیانگر وقوع دوره‌های متوالی خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف است (جدول ۲ و شکل ۴). برای مثال، در سال ۲۰۱۱، با مقادیر RDI-1 و RDI-3 به‌ترتیب حدود ۲/۰۱- و ۲/۴۵- نشان‌دهنده‌ی خشکسالی‌های کوتاه‌مدت و فصلی است که می‌تواند اثرات شدیدی را برمنابع آب داشته باشد. علاوه بر این، در سال ۲۰۱۸، کاهش قابل‌توجه شاخص RDI در مقیاس‌های میان‌مدت و بلندمدت (RDI-6≈-1.83 و RDI-12≈-2.29) می‌تواند نشان‌دهنده تداوم کمبود رطوبت و افزایش فشار بر ذخایر آبی حوضه باشد. این الگو با نتایج مطالعات انجام‌شده در سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران هم‌راستا است که نشان داده‌اند خشکسالی‌های میان‌مدت و بلندمدت ارتباط نزدیکی با افت سطح آب زیرزمینی و کاهش ذخایر آبی دارد (Vicente-Serrano et al., 2010؛ Pandya et al., 2020؛ Noori et al., 2023). نتایج این بخش نشان می‌دهد که شدت و تداوم خشکسالی‌های هواشناسی در مناطق نیمه‌خشک وابسته به مقیاس زمانی تحلیل است و همپوشانی مقادیر منفی شاخص RDI در چندین مقیاس زمانی، می‌تواند سبب افزایش آسیب‌پذیری سامانه‌های آبی و بخش کشاورزی حوضه شود. این یافته‌ها بر اهمیت پایش چندمقیاسی خشکسالی هواشناسی به‌منظور مدیریت مؤثر منابع آب در مناطق نیمه‌خشک تأکید دارند. در جدول ۲ ویژگی‌های خشکسالی (شدت، تداوم و دوره‌های بحرانی) در هرایستگاه بر اساس شاخص RDI ارائه شده است. در شکل ۴ شدت خشکسالی در هر ایستگاه در مقیاس زمانی مختلف ارائه شده است.

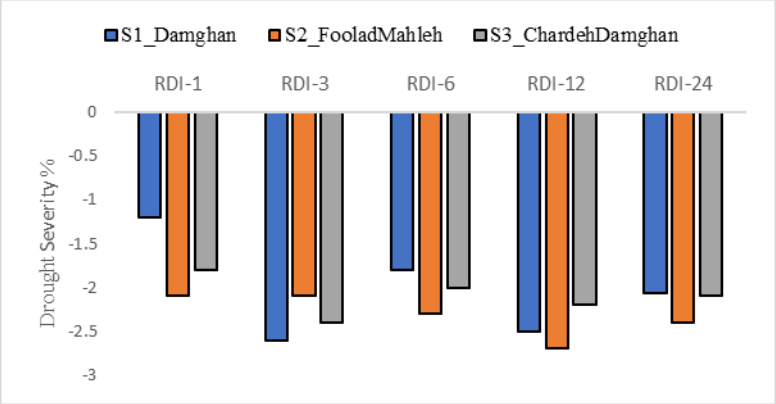
جدول ۲- ویژگی دوره‌های بحرانی خشکسالی در ایستگاه‌های مختلف بر اساس شاخصRDI

Table 2- Characteristics of critical drought periods at different stations based on the RDI index

Station	Index Scale	Drought Duration (months)	Mean Intensity (RDI)	Critical Years	Drought Type
S_1	RDI-1	6	-1.25	2013	Severe short-term
S_1	RDI-3	6	-1.02	2013	Moderate short-term
S_1	RDI-6	10	-1.12	2013-2014	Moderate short-term
S_1	RDI-12	12	-1.68	2000	Severe medium-term
S_1	RDI-24	16	-1.92	2014	Very severe long-term
S_2	RDI-1	7	-1.05	1990	Moderate short-term
S_2	RDI-3	7	-1.01	1990	Moderate short-term
S_2	RDI-6	12	-1.02	1990-1992	Moderate short-term
S_2	RDI-12	17	-1.88	1990-1996	Severe long-term
S_2	RDI-24	15	-1.21	1990-1996	Severe long-term
S_3	RDI-1	7	-1.02	1995	Moderate short-term
S_3	RDI-3	7	-1.12	1995	Moderate short-term
S_3	RDI-6	12	-1.21	1995-2013	Severe long-term
S_3	RDI-12	19	-2.01	1995–2015	Very severe long-term
S_3	RDI-24	16	-1.25	1995-2015	Severe long-term

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]



شکل ٤- شدت خشکسالی در ایستگاه‌ها و مقیاس‌های زمانی مختلف

Figure 4- Drought intensity at stations and across different time scales

الگوی زمانی-مکانی شدت خشکسالی در کل حوضه دامغان

مقایسه شدت خشکسالی هواشناسی در سه ایستگاه منتخب- S1 (دامغان)، S2 (فولادمحله) و S3 (چهارده دامغان) – نشان‌دهنده‌ی ناهمگنی قابل توجه مکانی و زمانی در رفتار خشکسالی در حوضه دامغان است. این تفاوت‌ها می‌تواند عمدتاً ناشی از موقعیت جغرافیایی، ارتفاع، نزدیکی به منابع آب و الگوهای محلی بارش و تبخیر-تعرق باشد که منجر به پاسخ‌های متمایز هر ایستگاه به کمبود بارش می‌شود. ایستگاه S1 (دامغان)، واقع در بخش مرکزی و پایین‌تر منطقه، بیش‌ترین تنوع شدت خشکسالی را در مقیاس‌های زمانی کوتاه تا میان‌مدت (RDI-1 تا RDI-12) نشان داد. در این ایستگاه، خشکسالی‌های بسیار شدید (RDI ≤ -2) به‌طور مکرر در سال‌های ۱۹۹۳، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ رخ داد که بیانگر آسیب‌پذیری بالای این ناحیه به نوسانات سریع اقلیمی و رویدادهای خشکسالی کوتاه‌مدت اما شدید است. چنین الگویی می‌تواند پیامدهای مستقیم بر کشاورزی آبی و منابع آب سطحی داشته باشد (شکل ۴).

ایستگاه S2 (فولادمحله) عمدتاً شدت بالاتر خشکسالی را در مقیاس‌های کوتاه‌مدت (RDI-1 و RDI-3) تجربه کرد که مستقیماً به نوسانات فصلی بارش و افزایش ناگهانی تبخیر-تعرق مرتبط است. این الگو می‌تواند حاکی از حساسیت بیش‌تر این ایستگاه به رویدادهای خشکسالی فصلی و گذرا باشد که معمولاً اثرات فوری بر کشاورزی دیم و رواناب سطحی دارند (شکل ۴).

در مقابل، ایستگاه S3 (چهارده دامغان) که در ارتفاعات بالاتر قرار دارد، الگویی متفاوت با تداوم بیش‌تر خشکسالی در مقیاس‌های میان‌مدت و بلندمدت (RDI-6 و RDI-12) را ارائه داد. مقادیر منفی پایدار شاخص RDI در این مقیاس‌ها نشان‌دهنده کاهش تدریجی و تجمعی رطوبت است که احتمالاً با افت سطح آب زیرزمینی و کاهش تغذیه آبخوان‌ها همراه است. این رفتار می‌تواند بیانگر تأثیر غالب فرآیندهای بلندمدت مانند نفوذ کند و ذخیره‌سازی زیرسطحی در نواحی مرتفع‌تر باشد(شکل ۴).

این ناهمگنی‌های مکانی-زمانی با یافته‌های مطالعات پیشین در مناطق نیمه‌خشک همخوانی دارد. برای مثال، (Worku, 2024) در منطقه نیمه‌خشک بورانا اتیوپی تفاوت‌های مشابه مکانی در شدت و فراوانی خشکسالی را گزارش کرد و تأکید نمود که عوامل محلی مانند توپوگرافی و توزیع بارش نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری الگوهای متفاوت ایفا می‌کنند. به‌طور مشابه (Xu et al., 2015)، در جنوب‌غرب چین نشان دادند که ناهمگنی فضایی می‌تواند تفاوت‌های قابل توجهی در پاسخ خشکسالی هواشناسی ایجاد کند. نتایج حاضر بر ضرورت رویکردهای مدیریت خشکسالی منطقه‌محور و مقیاس‌محور تأکید دارد؛ زیرا استراتژی‌های یکسان برای کل حوضه ممکن است در نواحی مختلف کارایی متفاوتی داشته باشند.

دوره‌های بحرانی در ایستگاه‌های هواشناسی حوضه

تحلیل RDI در ایستگاه‌های منتخب نشان داد که دوره‌های بحرانی خشکسالی از نظر شدت و تداوم به‌شدت وابسته به مقیاس زمانی تحلیل و موقعیت مکانی ایستگاه‌ها هستند. در همه ایستگاه‌ها، خشکسالی‌های بلندمدت (به‌ویژه در مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه) پایدارتر بوده و اثرات عمیق‌تری بر سامانه‌های آبی برجای گذاشته‌اند.

در ایستگاه S1 (دامغان)، طولانی‌ترین دوره خشکسالی در مقیاس RDI-24 با تداوم حدود ۱۶ ماه مشاهده شد (جدول ۲) که بیانگر اثر تجمعی کمبود بارش در بازه‌های زمانی بلندمدت است. درسال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ در اغلب مقیاس‌های زمانی به‌طور

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

هم‌زمان دوره‌های بحرانی شناسایی شد که نشان‌دهنده‌ی تداوم شرایط خشک و کاهش توان بازیابی منابع آبی است. با این حال، در مقیاس RDI-6 طی دوره ۲۰۱۵–۲۰۱۷، یک خشکسالی میان‌مدت با الگوی متفاوت مشاهده شد که می‌تواند بازتاب‌دهنده‌ی توزیع نامنظم بارش یا افزایش برداشت از منابع آب باشد. این نتایج با مطالعات پیشین همخوانی دارد که نشان دادند خشکسالی‌های بلندمدت بیش‌ترین تأثیر را بر تغذیه آبخوان‌ها، ذخایر سطحی و بهره‌وری کشاورزی دارند (Leelaruban et al., 2017؛ Secci et al., 2022).

در ایستگاه S2 (فولادمحله)، یک دوره بحرانی ممتد خشکسالی در بازه ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۶ مشاهده شد که بیانگر وقوع خشکسالی چندساله در حوضه است (جدول ۲). در این دوره بسته به مقیاس زمانی RDI، مدت تداوم خشکسالی از ۷ ماه در RDI-1 تا ۱۷ ماه در RDI-12 تغییر یافت که می‌تواند نشان دهد خشکسالی‌های بلندمدت، علاوه بر شدت، از پایداری زمانی بیش‌تری برخوردار هستند. هم‌چنین، در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ خشکسالی‌هایی به‌طور هم‌زمان در مقیاس‌های RDI-3، RDI-6 و RDI-12 مشاهده شد و طولانی‌ترین دوره خشکسالی مربوط به RDI-12 با تداوم ۱۵ ماه مشاهده شد. که این الگوها با یافته‌های مطالعات اخیر هم‌راستاست که تایید نمودند خشکسالی‌های بلندمدت (چندساله)، حتی با شدت متوسط، می‌توانند اثرات عمیقی بر جریان رودخانه‌ها و تغذیه آبخوان‌ها نسبت به خشکسالی‌های کوتاه‌مدت شدید داشته باشد (Leelaruban et al., 2017؛ Luo et al., 2024؛ Xue et al., 2024؛ Noori et al., 2023).

تحلیل RDI در ایستگاه S3 (چهارده دامغان) نشان داد که عمده دوره‌های خشکسالی در بازه ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۵ رخ داده است (جدول ۲). طولانی‌ترین تداوم خشکسالی در این ایستگاه برابر با ۱۹ ماه در مقیاس RDI-12 مشاهده شد. در این دوره، هم‌زمانی خشکسالی در مقیاس‌های RDI-3 و RDI-6 نیز مشاهده شد که می‌تواند بیانگر کاهش تجمعی بارندگی در چند سال متوالی و افزایش فشار بر جریان‌های سطحی و چرخه تغذیه آبخوان‌ها باشد. این یافته‌ها نشان‌دهنده ناهمگنی مکانی رفتار خشکسالی بوده و با نتایج مطالعات پیشین سازگار است که نقش عوامل محلی مانند توپوگرافی، پوشش زمین و توزیع مکانی بارش را در شکل‌گیری الگوهای متفاوت زمانی خشکسالی برجسته می‌کنند (Xu et al., 2015).

دوره‌های بحرانی خشکسالی در کل حوضه دامغان

تحلیل RDI در کل حوضه نشان داد که هر ایستگاه دوره‌های بحرانی متفاوتی را تجربه کرده است. در ایستگاه S1، طولانی‌ترین دوره خشکسالی در مقیاس RDI-24 (۱۶ ماه) رخ داد است. در این ایستگاه سال‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۰، ۲۰۱۳، و ۲۰۱۴ به‌عنوان دوره‌های بحرانی در مقیاس‌های مختلف شناسایی شده‌اند که نشان‌دهنده خشکسالی‌های گسترده و چندمقیاسی است. در ایستگاه S2، دوره ممتد خشکسالی (۱۹۹۰–۱۹۹۶) با تداوم ۷ ماه (RDI-1) تا ۱۷ ماه (RDI-12) مشاهده شد، که بیانگر اثر عمیق‌تر خشکسالی‌های بلندمدت بر منابع آب زیرزمینی است. در ایستگاه S3، طولانی‌ترین خشکسالی ۱۹ ماه در (RDI-12) بین سال‌های ۱۹۹۰–۲۰۱۵ رخ داد، اما توزیع زمانی آن نامنظم بود که نشان‌دهنده تأثیرپذیری از نوسانات اقلیمی و شرایط محلی (مانند توپوگرافی) است (جدول ۲). این الگوها نشان می‌دهند که ایستگاه‌های S2 و S3 بیش‌تر با خشکسالی‌های پایدار مواجه است، در حالی که S1 تحت تأثیر خشکسالی‌های شدید و چندمقیاسی قرار دارد. هم‌چنین، خشکسالی‌های بلندمدت و پایدار، به‌ویژه در مقیاس‌های زمانی ۱۲ و ۲۴ ماهه، مهم‌ترین تهدید برای پایداری منابع آب در حوضه دامغان محسوب می‌شوند. شناسایی این دوره‌های بحرانی می‌تواند نقش کلیدی در بهبود پایش خشکسالی، مدیریت منابع آب و تدوین راهبردهای سازگاری در برابر تغییرات اقلیمی ایفا کند.

الگوی مقادیر حداقل و حداکثر در ایستگاه‌های هواشناسی حوضه

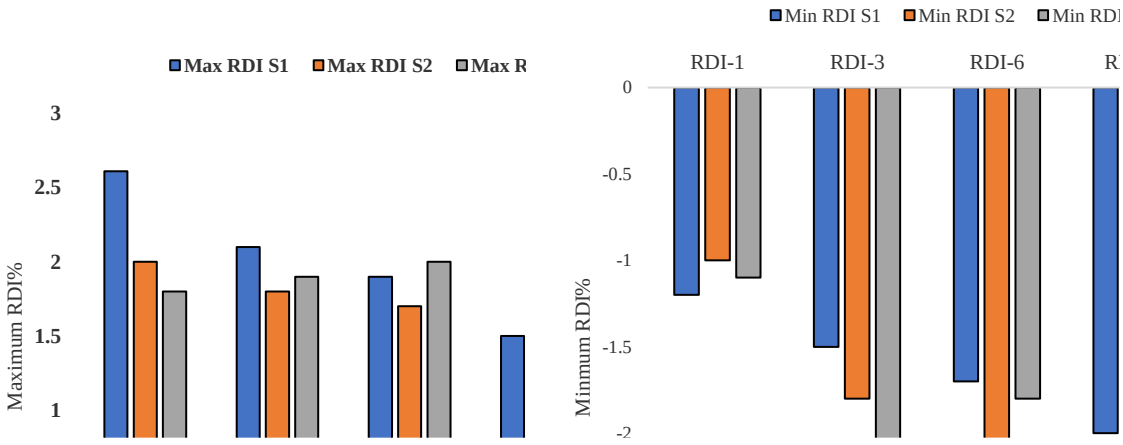
در ایستگاه S1، حداقل مقدار ثبت‌شده شاخص RDI برابر با ۲/۰۶- در مقیاس ۲۴ ماهه است که نشان‌دهنده‌ی خشکسالی شدید بلندمدت در دوره مطالعاتی است که می‌تواند به سبب اثر تجمعی کمبود بارش در بازه‌های زمانی بلندمدت باشد. در مقابل، بیش‌ترین مقدار RDI برابر با ۲/۶۱ در مقیاس یک‌ماهه مشاهده شد که می‌تواند بیانگر وقوع شرایط مرطوب کوتاه‌مدت و گذرا در یک بازه فصلی خاص باشد. بررسی روند تغییرات RDI در این ایستگاه نشان داد که مقادیر مثبت شاخص تا مقیاس ۶ ماهه افزایش یافته و سپس در مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه کاهش می‌یابد(شکل ۵). این الگو نشان می‌دهد که بارش‌های فصلی کوتاه‌مدت تأثیر قابل‌توجهی در مقیاس‌های کوتاه‌مدت دارند، اما در مقیاس‌های بلندمدت، نقش تجمع کمبود بارش و تداوم شرایط خشک غالب می‌شود. این رفتار با نتایج مطالعه (Zuo et al., 2022) همخوانی دارد که حساسیت بیش‌تر RDI به نوسانات سریع بارش در مقیاس‌های کوتاه‌مدت و غلبه اثرات تجمعی در مقیاس‌های بلندمدت را گزارش کرده‌اند.

در ایستگاه S2، کمترین مقدار شاخص RDI با مقدار ۲/۱۱- در مقیاس سه‌ماهه (RDI-3) و بیش‌ترین مقدار آن حدود ۲ در مقیاس‌های کوتاه‌مدت (RDI-1) ثبت شد. تحلیل تغییرات این شاخص نشان می‌دهد که شرایط مرطوب در این ایستگاه عمدتاً کوتاه‌مدت و

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

ناپایدار بوده و در مقیاس‌های زمانی بلندمدت تداوم نیافته است (شکل ۵). این الگو بیانگر آن است که دوره‌های ترسالی کوتاه‌مدت در این منطقه توان جبران اثرات خشکسالی‌های پیشین را ندارند؛ نتیجه‌ای که با یافته‌های Nwayor and Robeson, (2024) در مناطق خشک و نیمه‌خشک مطابقت دارد.

تحلیل شاخص RDI در ایستگاه S3 نشان داد که بالاترین مقدار منفی این شاخص برابر با ۲/۴۵- در مقیاس سه‌ماهه (RDI-3) است که بیانگر وقوع خشکسالی‌های شدید کوتاه‌مدت و فصلی در این ایستگاه است. بررسی دامنه تغییرات RDI نشان داد که مقادیر مثبت و منفی شاخص RDI در تمامی مقیاس‌های زمانی نسبتاً به یکدیگر نزدیک بوده و عمدتاً در بازه ۱/۵± نوسان داشته است. این ویژگی بیانگر نوسانات محدود در شدت خشکسالی و ترسالی است که می‌تواند حاکی از شرایط اقلیمی نسبتاً پایدارتر و یکنواخت‌تر در این ایستگاه نسبت به سایر بخش‌های منطقه مورد مطالعه باشد (شکل ۵). چنین الگویی با نتایج (Zhang et al., 2024) سازگار است که نوسانات محدود شاخص RDI را ناشی از یکنواختی الگوهای بارش و دما در مناطق با اقلیم پایدارتر گزارش کرده‌اند. به‌طور کلی، رفتار شاخص RDI در ایستگاه‌های مختلف به‌شدت وابسته به مقیاس زمانی تحلیل است؛ به‌گونه‌ای که شرایط مرطوب کوتاه‌مدت لزوماً به بهبود وضعیت خشکسالی در مقیاس‌های بلندمدت منجر نمی‌شود و خشکسالی‌های تجمعی در بازه‌های زمانی طولانی، نقش تعیین‌کننده‌تری در پایداری منابع آب ایفا می‌کنند.



شکل ۵- مقادیر حداقل و حداکثر شاخص RDI در حوضه دامغان

Figure 5- Minimum and maximum RDI index values in the Damghan Watershed

مقادیر حداقل و حداکثر RDI در حوضه دامغان

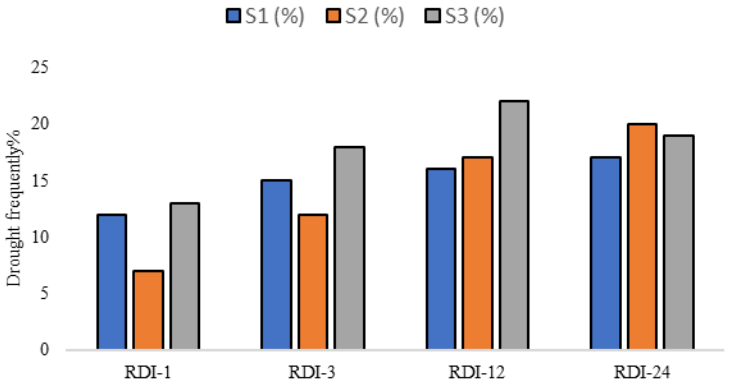
در ایستگاه S1، حداقل مقدار RDI برابر با ۲/۰۶- در RDI-24 نشان‌دهنده خشکسالی بلندمدت شدید و حداکثر مقدار ۲/۶۱ در RDI-1 بیان‌گر شرایط مرطوب کوتاه‌مدت است. روند RDI نشان داد که مقادیر مثبت در مقیاس‌های کوتاه‌مدت تا (RDI-6) افزایش می‌یابد، اما در مقیاس‌های بلندمدت (RDI-12 و RDI-24) کاهش یافته و خشکسالی غالب می‌شود. این الگو نشان‌دهنده تأثیر فوری بارش‌های فصلی و تسلط خشکسالی‌های تجمعی در بلندمدت است. در ایستگاه S2، مقدار (RDI-1) (۲/۱۲- در سال ۲۰۱۳) خشکسالی شدید کوتاه‌مدت و دوره ۱۹۹۰—۱۹۹۶ با تداوم ۷ تا ۱۷ ماه را نشان داد. مقادیر مثبت RDI عمدتاً کوتاه‌مدت و گذرا بودند. در ایستگاه S3، حداقل مقدار RDI ۲/۴۵- در RDI-3 خشکسالی فصلی شدید را نشان داد، در حالی که مقادیر RDI در بازه ۱/۵± نوسان داشتند که بیانگر اقلیم نسبتاً پایدارتر در این ایستگاه است (شکل ۵). این الگوها با یافته‌های Worku (2024) همخوان است که تفاوت‌های اقلیمی و لزوم تحلیل چندمقیاسی را تأیید کرد. در شکل ۶ مقادیر حداقل و حداکثر شاخص RDI در حوضه دامغان نشان داده شده است.

فراوانی خشکسالی در ایستگاه‌های هواشناسی حوضه

در ایستگاه S1 درصد وقوع خشکسالی‌های شدید (RDI ≤ -2) با افزایش بازه زمانی افزایش می‌یابد و مقدار آن بین ۱۲ تا ۱۷ درصد متغیر است (جدول ۲ و شکل ۶) این افزایش می‌تواند به سبب کاهش نقش نوسانات کوتاه‌مدت و انباشته کمبود بارش که منجر به غلبه شرایط بلندمدت برروند شاخص‌های خشکسالی شده است، باشد، این روند با یافته‌های پژوهش انجام‌شده در حوضه بورنادر اتیوپی Worku (2024) مطابقت دارد؛ نتایج آن‌ها نشان داد که در اقلیم‌های نیمه‌خشک، با افزایش مقیاس زمانی، احتمال وقوع خشکسالی‌ها افزایش می‌یابد. در ایستگاه S2 بیش‌ترین درصد وقوع خشکسالی شدید (RDI ≤ -2) در RDI-24 با حدود ۲۰ درصد مشاهده شد، که می‌تواند

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

نشان‌دهنده‌ی ارتباط مستقیم خشکسالی‌های بلندمدت با کاهش تغذیه آبخوان‌ها و افت منابع هیدرولوژیکی باشد. کمترین فراوانی خشکسالی شدید (RDI ≤ -2) در ایستگاه S2 با حدود ۷ تا ۱۴ درصد در مقیاس‌های کوتاه‌مدت (RDI-1 تا RDI3) مشاهده شد که می‌تواند بازتاب پاسخ سریع به نوسانات بارش باشد (شکل ۶). در ایستگاه S3 درصد وقوع خشکسالی‌های شدید (RDI ≤ -2) بین ۱۰ تا ۱۸ درصد در مقیاس‌های زمانی مختلف متغیر است به‌طوری که بیش‌ترین نرخ وقوع در مقیاس‌های بلندمدت (RDI-12 و RDI-24) (۱۸ درصد) مشاهده شد که نشان‌دهنده‌ی تأثیر غالب خشکسالی‌های پایدار بر منابع آب حوضه است. در مقابل، نرخ وقوع خشکسالی در مقیاس کوتاه‌مدت حدود ۱۰ درصد است که بیش‌تر بازتاب نوسانات گذرا و غیرپایدار بارش است (شکل ۶). این نتایج نشان می‌دهد که خشکسالی‌های کوتاه‌مدت اثرات گذرایی را ایجاد می‌کنند، خشکسالی‌های بلندمدت با تداوم بیش‌تر، اثرات عمیق‌تری بر منابع آب سطحی و زیرزمینی به جای می‌گذارند. این روند در مناطق نیمه‌خشک که بارش‌های نامنظم و متأثر از نوسانات اقلیمی دارند، برجسته‌تر است. بنابراین، این نتایج بر اهمیت پایش شاخص‌های بلندمدت مانند RDI-12 و RDI-24 در شناسایی خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و اثرات آن‌ها بر منابع آب زیرزمینی و کشاورزی تأکید دارد. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعه Luo et al. (2024) همخوانی دارد آن‌ها گزارش دادند در اقلیم‌های نیمه‌خشک، با افزایش بازه زمانی خشکسالی (SPI-6 و SPI-12) احتمال وقوع خشکسالی افزایش می‌یابد. این نتایج با مطالعات Zarei et al., (2023) و Shayeghi et al., (2024) هم‌راستا است که نشان دادند نرخ وقوع خشکسالی شدید در بازه زمانی ۱۲ ماهه (SPI-12) در مناطق نیمه‌خشک ایران بیش از ۱۰ درصد است. بنابراین، شاخص‌های بلندمدت (۱۲ و ۲۴ ماه) ابزارهای کلیدی برای پایش خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و طراحی استراتژی‌های مدیریت منابع آب در شرایط تغییر اقلیم محسوب می‌شوند.



شکل ٦- درصد فراوانی خشکسالی RDI در دوره‌های مختلف

Figure 6- Percentage frequency of RDI droughts during different periods

فراوانی خشکسالی در کل حوضه دامغان

تحلیل RDI در سه ایستگاه مورد مطالعه، الگوهای متفاوتی از فراوانی و شدت خشکسالی را در حوضه دامغان نشان داد. در ایستگاه S1، فراوانی خشکسالی‌های شدید (RDI ≤ -2) بین ۱۲ تا ۱۷ درصد متغیر بود و تداوم رخدادهای خشکسالی در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ بیانگر بروز شرایط بحرانی اقلیمی در این ایستگاه است. در ایستگاه S2، با افزایش مقیاس زمانی فراوانی خشکسالی افزایش می‌یابد. این این افزایش فراوانی در مقیاس RDI-24 (۲۰ درصدی) می‌تواند نشان‌دهنده‌ی اثر تجمعی کاهش تدریجی تغذیه آبخوان‌ها باشد. در مقابل، در مقیاس کوتاه‌مدت (RDI-1)، فراوانی خشکسالی حدود ۱۴ درصد مشاهده شد که می‌تواند به حساسیت سریع این ایستگاه نسبت به نوسانات بارش فصلی مرتبط باشد. در ایستگاه S3، فراوانی خشکسالی‌های شدید (بین ۱۰ تا ۱۸ درصد) در مقیاس‌های RDI-12 و RDI-24 مشاهده شد که نقش غالب خشکسالی‌های بلندمدت در کنترل منابع آب این ایستگاه را نشان می‌دهد (شکل ۶). این نتایج با یافته‌های Surendran et al. (2019) و Robertson et al. (2014) همخوانی دارد و نشان می‌دهد که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تحلیل چندمقیاسی خشکسالی می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای تدوین راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم، افزایش تاب‌آوری منابع آب و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی و کشاورزی فراهم کند.

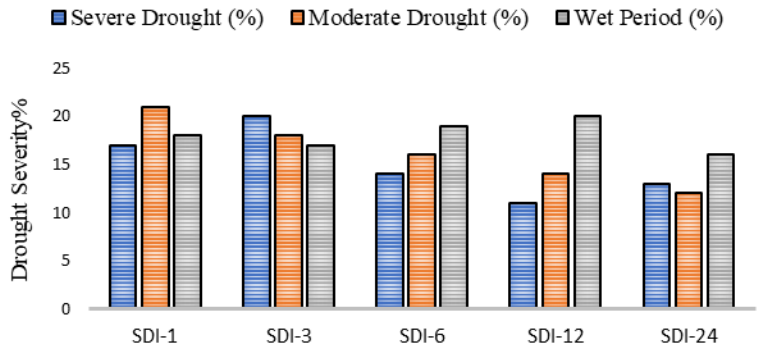
شاخص SDI در ایستگاه هیدرومتری

تحلیل SDI در ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی حوضه نشان داد که خشکسالی‌های هیدرولوژیکی به شدت به مقیاس زمانی وابسته‌اند. بیش‌ترین فراوانی خشکسالی (۲۰ درصد) در مقیاس کوتاه‌مدت (SDI-3) مشاهده شد، که بیان‌گر حساسیت بالای جریان رودخانه به نوسانات

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

فصلی بارش و رواناب است. در مقابل، کمترین فراوانی خشکسالی شدید (SDI ≤ -2) با ۱۱ درصد در مقیاس میان‌مدت (SDI-12) مشاهده شد، که نشان‌دهنده پایداری نسبی جریان در بازه‌های بلندمدت است. الگوی فراوانی خشکسالی‌های شدید غیرخطی است: با کاهش مقیاس زمانی از بلندمدت (SDI-24) به کوتاه‌مدت (SDI-3)، فراوانی افزایش یافته و سپس با افزایش مجدد مقیاس زمانی کاهش می‌یابد (شکل ۷). این رفتار می‌تواند ناشی از دخالت‌های انسانی مانند سدسازی، مدیریت مخازن، و تنظیم جریان رودخانه باشد که اثرات خشکسالی‌های کوتاه‌مدت را تقویت و اثرات بلندمدت را تعدیل می‌کند. این نتایج با یافته‌های مطالعه Nasiri et al. (2022) و Yang et al. (2020) هم‌خوانی دارد. نتایج آن‌ها نشان داد که دخالت‌های انسانی، به‌ویژه سدسازی و تنظیمات مصنوعی جریان، منجر به تغییر در الگوهای زمانی و شدت SDI می‌شوند. تحلیل چندمقیاسی SDI برای درک این الگوهای پیچیده و مدیریت منابع آب ضروری است.



شکل ۷- مقدار SDI در ایستگاه هیدرومتری در حوضه دامغان

Figure 7- SDI value at the hydrometric station in the Damghan Watershed

فراوانی وقوع دوره‌های مرطوب

فراوانی دوره‌های مرطوب (SDI ≥ 2) نیز به مقیاس زمانی وابسته بود. بیش‌ترین فراوانی (۲۰ درصد) در SDI-12 و کمترین (۱۶ درصد) در SDI-24 مشاهده شد. میانگین فراوانی دوره‌های مرطوب (۱۶ درصد) نزدیک به میانگین دوره‌های خشک بود، که نشان‌دهنده تعادل نسبی سامانه هیدرولوژیکی در پاسخ به نوسانات اقلیمی است. این الگو با نتایج پژوهش Singh et al. (2021) هم‌راستا است. آن‌ها تایید نمودند که دوره‌های مرطوب در مقیاس‌های میان‌مدت مانند SDI-12 اغلب به عنوان دوره‌های ترمیمی پس از خشکسالی‌های شدید شناخته می‌شوند. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده روند طبیعی بهبود شرایط هیدرولوژیکی، بازیابی تدریجی منابع آبی، و نقش مهم مقیاس‌های میان‌مدت در پایش و مدیریت منابع آب است.

فراوانی شرایط نزدیک به نرمال (-0.99 ≤ SDI ≤ 0.99) در مقیاس‌های مختلف به ترتیب ۷۱ (SDI-1)، ۶۲ (SDI-3)، ۶۰ (SDI-6)، ۶۹ (SDI-12) و ۶۹ درصد (SDI-24) بود. بالاترین فراوانی در مقیاس‌های کوتاه‌مدت (SDI-1 و SDI-3) نشان‌دهنده پاسخ سریع جریان رودخانه به تغییرات بارش است. این ویژگی به دلیل ظرفیت کم ذخیره‌سازی آب در خاک و نبود جریان پایه در مناطق نیمه‌خشک است، که با یافته‌های Koch et al. (2020) همخوانی دارد که نشان می‌دهد در مناطق نیمه‌خشک، الگوهای بارش نامنظم و متغیرهای اقلیمی باعث تغییرات قابل توجهی در رواناب می‌شوند. به دلیل ظرفیت کم ذخیره‌سازی آب در خاک، جریان پایه اغلب وجود ندارد و رودخانه‌ها برای دوره‌های طولانی خشک می‌مانند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که واکنش رواناب به تغییرات بارش بسیار سریع و حساس باشد. از این‌رو رواناب و شرایط هیدرولوژیکی به‌ویژه در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت، به سرعت به تغییرات بارش واکنش نشان می‌دهند.

فراوانی وقوع دوره‌های خشکسالی

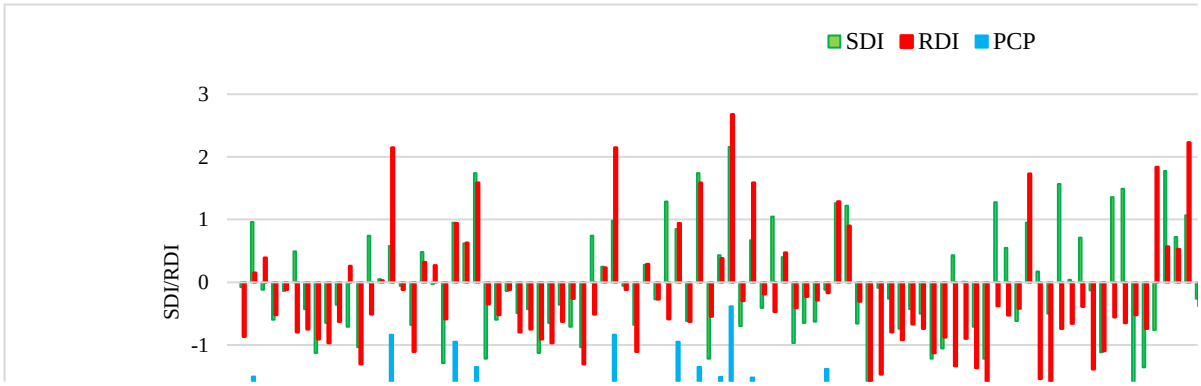
فراوانی خشکسالی‌های متوسط (-1 ≤ SDI ≤ -1.49) در مقیاس کوتاه‌مدت (SDI-1) بیش‌ترین و در مقیاس بلندمدت (SDI-24) کمترین مقدار را داشت. این الگو نشان‌دهنده تأثیر سریع تغییرات بارش در بازه‌های کوتاه‌مدت و تعدیل اثرات خشکسالی در بازه‌های بلندمدت به دلیل مدیریت منابع آب (مثل ذخیره‌سازی) است. این نتایج با مطالعه Zhao et al. (2022) در حوضه ویهه چین هم‌خوان است آن‌ها گزارش نمودند خشکسالی‌های هیدرولوژیکی با شدت متوسط بیش‌تر در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت، به‌ویژه دوره‌های سه‌ماهه رخ می‌دهند؛ در حالی‌که خشکسالی‌های هواشناسی عمدتاً در بازه‌های زمانی بلندمدت مانند SPI-12 مشاهده می‌شوند. از این‌رو نتایج مطالعه حاضر هم‌راستا با مطالعه آن‌ها فراوانی بالاتر خشکسالی‌های متوسط در مقیاس‌های کوتاه‌مدت را گزارش کرد. بر این اساس، توجه به مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت در

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب می‌تواند به پیشگیری مؤثرتر از خشکسالی‌های متوسط کمک کرده و کارایی تصمیم‌گیری‌های مدیریتی را افزایش دهد.

اعتبارسنجی شاخص‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی

برای اعتبارسنجی، مقادیر RDI و SDI با روند تغییرات بارش سالانه مقایسه شدند. سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۶ به‌عنوان دوره‌های مرطوب با مقادیر مثبت RDI و SDI حوضه شناسایی شد، در حالی که سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ به‌عنوان دوره‌های خشک با مقادیر منفی شاخص‌ها تأیید شدند (شکل ۸). این هم‌خوانی، دقت شاخص‌ها را در بازتاب شرایط اقلیمی منطقه نشان می‌دهد. این یافته‌ها با مطالعه Cao et al. (2023) همخوان است که تناوب دوره‌های خشک و مرطوب را در مناطق نیمه‌خشک گزارش کردند. این نتایج بر اهمیت تحلیل چندمقیاسی برای مدیریت منابع آب، به‌ویژه در بخش کشاورزی، تأکید دارند. در شکل ۸ روند شاخص‌های RDI و SDI با بارش همزمان در حوضه دامغان نشان داده شده است.



شکل ۸- روند SDI، DRI و بارش در حوضه دامغان

Figure 8- Trend of RDI, SDI, and precipitation in Damghan Watershed

تحلیل روند چند مقیاس خشکسالی

الف-تحلیل روند و همبستگی زمانی بین RDI و SDI

تحلیل روند زمانی شاخص‌های RDI (۱۹۹۰–۲۰۲۰) و SDI (۲۰۰۸–۲۰۱۸) با استفاده از آزمون ناپارامتریک من–کندال و تخمین‌گر شیب سن درسطح معنی‌داری ($p < 0.05$) نشان داد که هر دو شاخص در مقیاس‌های میان‌مدت (۶ ماهه) و بلندمدت (۱۲ ماهه) روند کاهشی معناداری را نشان داده‌اند. مقادیر منفیZ و مقادیر منفی تخمین‌گر شیب سن حاکی از افزایش تدریجی شدت و استمرار خشکسالی در طی دوره مطالعاتی است، در حالی‌که عدم معناداری در مقیاس ۱ ماهه احتمالاً بازتاب‌دهنده نوسانات فصلی و تأثیر رویدادهای بارشی گذرا بر این شاخص‌ها است (جدول ۳). این الگو نشان می‌دهد که پیامدهای خشکسالی در این حوضه ماهیتی تجمعی دارد و کاهش‌های متوالی بارش و رواناب در بازه‌های طولانی‌تر بیش‌تر خود را بروز می‌دهد (Mishra and Singh, 2010). این یافته‌ها هم‌راستا با مطالعه Achite et al. (2023) است. آن‌ها گزارش دادند که همبستگی‌های قوی و روندهای منفی در شاخص‌های خشکسالی در بازه‌های میان‌مدت می‌تواند ناشی از تغییر الگوی بارش و افزایش تبخیر مؤثر باشد. در جدول ۳ نتایج آزمون‌های آماری هریک از شاخص‌های RDI و SDI در حوضه دامغان ارائه شده است.

جدول ۳- نتایج روند شاخص‌های RDI و SDI در مقیاس‌های زمانی

Table 3- Trend results of RDI and SDI indices at time scales

Index	Z (MK)	Sen's Slope	Index	Z (MK)	Sen's Slope
RDI-1	-1.05	-0.010	SDI-1	-1.32	-0.011
RDI-3	-1.88	-0.022*	SDI-3	-2.05	-0.025*
RDI-6	-2.24	-0.030*	SDI-6	-2.65	-0.030*
RDI-12	-2.85	-0.040**	SDI-12	-3.10	-0.050**
RDI-24	-1.92	-0.028*	SDI-24	-2.45	-0.045*

**p < 0.01, *p<0.05

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های SDI و RDI در مقیاس‌های زمانی مختلف نشان داد در سطح معنی‌داری ($p < 0.05$) مقدار همبستگی بین RDI و SDI در محدوده ۰/۷۸ تا ۰/۸۳ متغیر است (جدول ۴). در مقیاس سه‌ماهه (SDI-3) با مقدار ۰/۸۱ نشان داد که تغییرات در خشکسالی هواشناسی به‌طور مستقیم بر خشکسالی‌های هیدرولوژیکی تأثیر می‌گذارد و انتقال اثر خشکسالی از جو به سامانه‌های هیدرولوژیکی به‌صورت تدریجی و وابسته به مقیاس انجام می‌شود. ضرایب همبستگی در مقیاس‌های مختلف نشان داد که در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر (۱ تا ۳ ماهه)، SDI نوسانات بیش‌تری نسبت به RDI دارد، که بیانگر حساسیت بالاتر SDI به تغییرات سریع جریان رودخانه و شرایط سطحی است. در مقابل، در مقیاس‌های بلندمدت (۱۲ تا ۲۴ ماهه) شدت همبستگی نسبتاً ثابت ماند، که نشان‌دهنده‌ی پایداری و تأخیر زمانی پاسخ هیدرولوژیکی نسبت به تغییرات اقلیمی است. این یافته‌ها تاییدکننده ماهیت چندمقیاسی خشکسالی در حوضه دامغان هستند، به‌گونه‌ای که SDI در مقیاس‌های کوتاه‌مدت می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای پایش زودهنگام تغییرات هیدرولوژیکی و تشخیص سریع اثرات کاهش بارش بر رواناب مورد استفاده قرار گیرد. این نتایج با مطالعات (Zhao et al., 2022) و (Vicente-Serrano et 2010al.,) هم‌راستا است که بر نقش کلیدی مقیاس‌های زمانی مختلف در انتقال خشکسالی از سطح جو به هیدروسفر تأکید دارند. در جدول ۴ ضریب همبستگی پیرسون بین RDI و SDI در مقیاس‌های زمانی مختلف ارائه شده است.

جدول ٤- ضریب همبستگی پیرسون بین RDI و SDI در مقیاس‌های زمانی

Table 4- Pearson correlation coefficient between RDI and SDI across time scales

Index	Pearson correlation
1-month	0.78
3-month	0.81
6-month	0.8
12-month	0.83
24-month	0.79

ب-تحلیل همبستگی با وقفه زمانی بین شاخص‌ها RDI و SDI

نتایج تحلیل همبستگی با وقفه زمانی بین شاخص‌های RDI و SDI نشان داد که با افزایش وقفه زمانی، ضریب همبستگی به‌تدریج افزایش یافته و در وقفه سه‌ماهه به بیشینه مقدار خود می‌رسد ($r = 0.71$، $p < 0.001$). پس از این وقفه، شدت همبستگی کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که در وقفه‌های بیش از پنج ماه رابطه تضعیف شده و در وقفه شش‌ماهه از نظر آماری معنادار نیست (جدول ۵). این الگو می‌تواند بیانگر وجود یک پاسخ تأخیری مشخص در سامانه هیدرولوژیکی نسبت به کمبود بارش باشد، به‌گونه‌ای که اثرات خشکسالی هواشناسی با یک تأخیر چندماهه در جریان‌های سطحی نمایان می‌شود و زمان انتقال غالب خشکسالی در منطقه دامغان را حدود سه ماه نشان می‌دهد (جدول ۵). غالب بودن وقفه زمانی سه‌ماهه را می‌توان بازتاب‌دهنده‌ی حافظه هیدرولوژیکی حوضه و عملکرد فرآیندهای تجمعی دانست. به طوری‌که پس از کاهش بارش، رطوبت خاک به‌صورت آنی تخلیه نمی‌شود و ظرفیت ذخیره‌سازی لایه‌های سطحی و زیرسطحی خاک می‌تواند برای مدتی تبخیر–تعرق و بخشی از تولید رواناب را پشتیبانی کند. از سوی دیگر، تولید رواناب در حوضه‌های نیمه‌خشک مانند دامغان عمدتاً تابع شرایط رطوبت پیشین خاک و عبور از آستانه‌های بحرانی است؛ بنابراین، کمبود بارش در مقیاس کوتاه‌مدت الزاماً به افت فوری جریان منجر نمی‌شود و پاسخ هیدرولوژیکی با تأخیر ظاهر می‌شود. علاوه بر این، جریان پایه که از ذخایر زیرسطحی و آبخوان‌های کم‌عمق تغذیه می‌شود، در مراحل ابتدایی خشکسالی هواشناسی می‌تواند کاهش رواناب سطحی را تا حدی جبران کند. با تداوم شرایط خشک و کاهش تغذیه آبخوان‌ها، افت جریان پایه به‌تدریج رخ داده و خشکسالی هیدرولوژیکی در حوضه پس از یک وقفه زمانی سه ماهه نمایان می‌شود.

یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات اخیر همخوانی دارد. به‌عنوان مثال، (Liu et al., 2025) بر ماهیت تجمعی و تأخیری انتقال خشکسالی از جو به هیدروسفر تأکید کرده‌اند. (Cristina et al., 2025) نشان داده‌اند که مدت وقفه و شدت همبستگی به رژیم اقلیمی، ویژگی‌های فیزیکی حوضه و تداوم خشکسالی وابسته است، به‌طوری‌که خشکسالی‌های پایدارتر معمولاً وقفه‌های طولانی‌تری ایجاد می‌کنند. هم‌چنین، (Wang et al., 2024) گزارش کرده‌اند که این رابطه می‌تواند دارای تغییرات فصلی باشد، به‌گونه‌ای که در دوره‌های مرطوب‌تر، همبستگی قوی‌تر و وقفه کوتاه‌تر مشاهده می‌شود. افزون بر این، (Zhang et al., 2023a) به نقش فرآیندهای غیرخطی و مداخلات انسانی، از جمله بهره‌برداری از آب زیرزمینی و تنظیم جریان، در تغییر زمان و شدت انتقال خشکسالی اشاره کرده‌اند که می‌تواند رابطه بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی را تضعیف یا تقویت کند.

در مجموع، نتایج این مطالعه تأیید می‌کند که انتقال خشکسالی فرآیندی چندزمانه و وابسته به ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه است که تحت تأثیر هم‌زمان شرایط اقلیمی، ظرفیت ذخیره‌سازی سامانه و فعالیت‌های انسانی قرار دارد. غالب بودن وقفه سه‌ماهه بر ضرورت

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

استفاده از تحلیل‌های مبتنی بر وقفه زمانی در پایش خشکسالی تأکید می‌کند و نشان می‌دهد که کمبود بارش باید از تداوم کافی برخوردار باشد تا بتواند اثر معناداری بر شاخص‌های هیدرولوژیکی برجای بگذارد. این رویکرد چندمقیاسی درک دقیق‌تری از پویایی خشکسالی فراهم می‌کند و می‌تواند مبنایی برای بهبود پیش‌بینی خشکسالی و ارتقای مدیریت منابع آب در شرایط تغییر اقلیم باشد.

جدول ۵- ضرایب همبستگی پیرسون (r) و سطوح معناداری (p-value) بین RDI و SDI در وقفه‌های زمانی مختلف (دوره هم‌پوشانی ۲۰۰۸–۲۰۱۸)

Table 5- Pearson correlation coefficients (r) and significance levels (p-values) between the RDI and SDI at different time lags (overlapping period: 2008–2018)

Lag (months)	r (RDI–SDI)	p-value	Significance
0	0.42	0.018	*
1	0.55	0.006	**
2	0.63	0.001	**
3	0.71	<0.001	***
4	0.60	0.003	**
5	0.48	0.021	*
6	0.32	0.084	Ns

تحلیل همبستگی با وقفه زمانی برای شناسایی زمان انتقال غالب خشکسالی هواشناسی به هیدرولوژیکی نشان‌داد.
بیشینه همبستگی در وقفه سه‌ماهه مشاهده شد ($r = 0.71$، $p < 0.001$).
سطوح معناداری $p < 0.001$***، $p < 0.01$**، $p < 0.05$*؛ ns: بی‌معنی).

با وجود نتایج معنادار و نوآورانه این مطالعه در زمینه تحلیل همبستگی تأخیری و انتقال زمانی خشکسالی بین شاخص‌های RDI و SDI ، لازم است محدودیت‌های کلیدی آن به‌طور صریح بررسی شود. این محدودیت‌ها، در مناطق نیمه‌خشک ایران اگرچه اجتناب‌ناپذیر هستند، بر قابلیت تعمیم‌پذیری یافته‌ها تأثیر می‌گذارند. با این حال، آن‌ها همزمان فرصتی برای تحقیقات آینده فراهم می‌آورند و می‌توانند به‌عنوان پایه‌ای برای توسعه روش‌شناسی‌های پیشرفته‌تر عمل کنند. یکی از محدودیت‌های اصلی، وابستگی تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی به داده‌های یک ایستگاه هیدرومتری (ایستگاه شهید شاه‌چراغ) در خروجی حوضه دامغان است. این رویکرد، که ناشی از کمبود داده‌های بلندمدت و پیوسته هیدرولوژیکی در حوضه است، که تمرکز را بر رفتار هیدرولوژیکی بخش خاصی از حوضه محدود می‌کند و ممکن است الگوهای انتقال خشکسالی در زیرحوضه‌های بالادست یا مناطقی با ناهمگنی مکانی را به‌طور کامل پوشش ندهد. از این‌رو، این محدودیت می‌تواند منجر به برآورد نادرست وقفه زمانی غالب (سه‌ماهه) در سطح کل حوضه شود، زیرا پاسخ هیدرولوژیکی ایستگاهی تحت تأثیر جریان‌های محلی و تجمعی بالادست قرار می‌گیرد. گزارش‌های (Maghrebi et al., 2020) در مورد خطاهای هیدرولوژیکی در ایران نشان می‌دهند که چنین محدودیت‌هایی می‌تواند تعمیم‌پذیری نتایج را ۲۰–۳۰ درصد کاهش دهد. هم‌چنین، دامنه ارتفاعی گسترده (۱۲۸۱ تا ۳۷۴۴ متر)، تنوع سازندهای زمین‌شناسی (از آبرفتی و آهکی تا کم‌نفوذ) و گوناگونی کاربری اراضی (مرتعی، کشاورزی و بیابانی) می‌توانند تفاوت‌های معناداری در زمان پاسخ و شدت واکنش زیرحوضه‌ها به خشکسالی هواشناسی ایجاد کنند (Noori et al., 2023؛ Khosravi et al., 2022) در نتیجه، الگوی انتقال خشکسالی و وقفه زمانی استخراج‌شده در این مطالعه، اگرچه مفهومی قوی دارد، اما ممکن است به‌طور مستقیم به کل حوضه قابل تعمیم نباشد، به‌ویژه در مناطقی با توپوگرافی پیچیده که فرآیندهای نفوذ و رواناب متفاوت عمل می‌کنند. محدودیت دیگر، نبود داده‌های کمی‌سازی شده و بلندمدت فعالیت‌های انسانی مانند برداشت بیش‌ازحد آب زیرزمینی، تنظیم جریان رودخانه‌ها توسط سازه‌های آبی و تغییرات کاربری اراضی است، که امکان کمی‌سازی مستقیم اثرات انسانی را محدود می‌کند. این فعالیت‌ها می‌تواند رژیم جریان طبیعی را تغییر دهند و اعتبار SDI مبتنی بر فرض جریان طبیعی) را تحت تأثیر قرار دهند (Yang et al., 2020؛ Nasiri et al., 2022) که می‌تواند به برآورد نادرست شدت یا زمان انتقال خشکسالی هیدرولوژیکی منجر شود، زیرا مداخلات انسانی ممکن است وقفه زمانی را به صورت مصنوعی تغییر دهد یا اثرات خشکسالی را تشدید کند. اگرچه ایستگاه مورد مطالعه اثرات تجمعی بالادست را تا حدی منعکس می‌کند، اما برداشت‌های محلی پراکنده می‌تواند بایاس ایجاد کند، همان‌طور که در مطالعات (Noori et al., 2023) به عنوان یک محدودیت در مورد منابع آب زیرزمینی گزارش شده است. باوجود این محدودیت‌ها، یافته‌های این مطالعه — از جمله وقفه زمانی غالب سه‌ماهه و چارچوب تحلیلی چندمقیاسی — الگوی کلی انتقال خشکسالی و حافظه هیدرولوژیکی را در مقیاس محلی به‌خوبی تبیین می‌کند و با نتایج حوضه‌های نیمه‌خشک دیگر همخوانی دارد. بنابراین، این نتایج می‌توانند پایه‌ای علمی برای تحقیقات آینده باشند، هرچند مقادیر دقیق وقفه و همبستگی ممکن است به شرایط محلی وابسته باشد. برای غلبه بر این محدودیت‌ها و افزایش دقت و تعمیم‌پذیری، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده از داده‌های چندین ایستگاه هیدرومتری، محصولات شبکه‌ای بارش و تبخیر–تعرق (مانند ERA5 و CHIRPS)، مدل‌های هیدرولوژیکی توزیع‌شده (مانند SWAT یا VIC) و تحلیل‌های مکانی جامع استفاده

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

شود. هم‌چنین، پیشنهاد می‌شود از سری‌های جریان یا شبیه‌سازی‌های مدل‌محور برای تعدیل اثرات انسانی، برای ارتقای تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی استفاده شود. چنین رویکردهایی نه‌تنها خلأهای داده‌ای فعلی را پر می‌کنند، بلکه به توسعه سامانه‌های پایش و پیش‌بینی خشکسالی کارآمد در مناطق نیمه‌خشک ایران کمک می‌کنند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تبیین الگوی زمانی خشکسالی و بررسی نحوه انتقال خشکسالی هواشناسی به خشکسالی هیدرولوژیکی در حوضه دامغان انجام شد. نتایج حاصل از تحلیل شاخص‌های RDI و SDI نشان داد که خشکسالی در این منطقه ماهیتی چندمقیاسی و انتقالی دارد و پاسخ سامانه هیدرولوژیکی نسبت به کمبود بارش به‌صورت هم‌زمان نبوده، بلکه با یک وقفه زمانی مشخص بروز می‌کند. تحلیل همبستگی با وقفه زمانی نشان داد که بیش‌ترین ارتباط بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در وقفه زمانی سه‌ماهه رخ می‌دهد که بیانگر وجود حافظه هیدرولوژیکی و نقش فرآیندهای تجمعی حوضه در انتقال اثرات خشکسالی است. بررسی رفتار شاخص‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف نشان داد که SDI در مقیاس‌های کوتاه‌مدت نوسانات بیش‌تری نسبت به RDI دارد و نسبت به تغییرات سریع جریان رودخانه حساس‌تر است، در حالی‌که در مقیاس‌های بلندمدت، الگوی پایدارتر و تجمعی‌تری از خشکسالی هیدرولوژیکی مشاهده می‌شود. این نتایج اهمیت تحلیل چندمقیاسی خشکسالی و پرهیز از تفسیر هم‌زمان شاخص‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی را به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک برجسته می‌سازد. با وجود معنادار بودن نتایج، باید توجه داشت که تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی در این مطالعه بر اساس داده‌های یک ایستگاه هیدرومتری انجام شده است؛ از این‌رو، یافته‌های مربوط به SDI نماینده رفتار کل حوضه دامغان نبوده و تعمیم آن‌ها به کل حوضه باید با احتیاط صورت گیرد. با این حال، چارچوب تحلیلی ارائه‌شده در این پژوهش، به‌ویژه استفاده از تحلیل همبستگی با وقفه زمانی، قابلیت به‌کارگیری در سایر حوضه‌ها و مطالعات مشابه را دارد. در مجموع، این مطالعه با تمرکز بر تحلیل وقفه زمانی، چارچوبی کمی برای تبیین انتقال خشکسالی هواشناسی به خشکسالی هیدرولوژیکی ارائه می‌دهد که می‌تواند به بهبود پایش خشکسالی، درک بهتر پاسخ سامانه‌های هیدرولوژیکی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب در مناطق نیمه‌خشک کمک کند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، با بهره‌گیری از داده‌های چند ایستگاه هیدرومتری و انجام تحلیل‌های مکانی، قابلیت تعمیم نتایج تقویت شده و تصویر جامع‌تری از رفتار خشکسالی هیدرولوژیکی در سطح حوضه ارائه شود.

ملاحظات اخلاقی

دسترسی به داده‌ها: داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

حمایت مالی: این پژوهش در قالب طرح پسادکتری به شماره ۲۰۹۰۵ توسط دانشگاه سمنان حمایت مالی شده است.

مشارکت نویسندگان: **خسروی، م.:** مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخه اولیه مقاله، **یزدانی، م.ر.:** ویرایش و بازبینی مقاله.

تضاد منافع نویسندگان: نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

سپاس‌گزاری: بدین‌وسیله مراتب قدردانی صمیمانه خود را از دانشگاه سمنان به خاطر حمایت مالی و اداری از طرح تحقیقاتی که طی قرارداد شماره ۲۰۹۰۵ نقش بسزایی در پیشبرد این مطالعه داشتند، ابراز می‌داریم.

منابع

احمدی، رویا، قاسمیه، هدی، و غزاوی، رضا (۱۴۰۴). ارزیابی وضعیت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: زیرحوضه‌های فلات مرکزی). هیدروژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، ۱۱(۴۱)، ۸۷–۱۱۴. **doi:**10.22034/HYD.2024.62269.1746

خسروی، مهین، و یزدانی، محمدرضا (۱۴۰۳). بررسی اثرات خشکسالی روی الگوی زمانی تغذیه آبخوان‌ها در آبخیز دامغان‌رود. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۸(۱)، ۳۰–۶۰. **doi:** 10.22092/WMRJ.2024.365662.1585

خسروی، مهین، ذوالفقاری، علی اصغر، کابلی، سیدحسن، و غفاری، حیدر (۱۴۰۱). کاربرد نقشه‌برداری دیجیتال خاک در کلاس‌بندی ذرات خاک و تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برای مدیریت بهینه حوضه‌های آبریز (مطالعه موردی: حوضه دامغان‌رود). آب و خاک ایران، ۵۳(۲)، ۲۴۵–۲۶۱. **doi:**10.22059/IJSWR.2022.333013.669113

References

Achite, M., Simsek, O., Adarsh, S., Hartani, T., & Caloiero, T. (2023). Assessment and monitoring of meteorological and hydrological drought in semiarid regions: The Wadi Ouahrane basin case study (Algeria). *Physics and Chemistry of the Earth*, 130, 103386. **doi:**10.1016/j.pce.2023.103386

Adib, A., Amiri, M., Lotfirad, M., & Farajpanah., H. (2024). Evaluation of meteorological drought using SPI and SPEI on wheat yield in southwestern Iran. Earth, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

5(4), 1023–1051. **doi:**org/10.3390/earth5040053

Ahmadi, R., Ghasemieh, H., & Ghazavi, R. (2025). Assessment of meteorological and hydrological drought situation (Case study: Sub-basins in the Central Plateau Basin). *Journal of Hydrogeomorphology*, 11(41), 114-87. **doi:**10.22034/hyd.2024.62269.1746. [In Persian]

Asadi Zarch, M.A., Malekinezhad, H., Mobin, MH., Dastorani, MT., & Kousari, MR. (2011). Drought Monitoring by reconnaissance drought index (RDI) in Iran. *Water Resources Management*, 25, 3485–3504 **doi:**10.1007/s11269-011-9867-1

Cammalleri, C., Barbosa, P., & Vogt., J. V. (2019). Analysing the relationship between multiple-timescale SPI and GRACE terrestrial water storage in the framework of drought monitoring. *Water*, 11, 1672. **doi:**10.3390/w11081672

Cao, L., Xu, C., Suo, N., Song, L., & Lei, X. (2023). Future dry-wet climatic characteristics and drought trends over arid Central Asia. *Frontiers in Earth Science*, 11(1), 1102633. **doi:**10.3389/feart.2023.1102633

de Medeiros, G. C. S., da Silva, S. M. O., Estácio, Á. B. S., de Carvalho Studart, T. M., & de Assis de Souza Filho, F. (2025). Time lags between meteorological and hydrological droughts: Evaluating Indicator scales and propagation patterns. *Climate*, 13(11), 220. **doi:**10.3390/cli13110220

Fooladi, M., Golmohammadi, M.H., Rahimi, I., Safavi, H.R., & Nikoo, M.R. (2023). Assessing the changeability of precipitation patterns using multiple remote sensing data and an efficient uncertainty method over different climate regions of Iran. *Expert Systems with Applications*, Pergamon 221:119788. doi; 10.1016/j.eswa.2023.119788

Gocic, M., & Trajkovic, S. (2013). Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*, 100, 172–182. **doi:**10.1016/j.gloplacha.2012.10.014

Habibi, B., Meddi, M., Torfs, P.J.J.F., Remaoun, M., & Van, Lanen. H.A.J. (2018). Characterisation and prediction of meteorological drought using stochastic models in the semi-arid Chéliff–Zahrez basin (Algeria). *Journal of Hydrology: Regional Studies, 16*, 15-31. **doi:**10.1016/j.ejrh.2018.02.005

hang, Y., Wang, P., Chen, Y., Yang, J., Wu, D., Ma, Y., Huo, Z., & Liu, S. (2023b). The optimal time-scale of Standardized Precipitation Index for early identifying summer maize drought in the Huang-Huai-Hai region, China. Journal of Hydrology: Regional Studies. *Elsevier* 46:101350. **doi:**10.1016/j.ejrh.2023.101350

Jahangir, M.H., & Yarahmadi, Y. (2020). Hydrological drought analyzing and monitoring by using Streamflow Drought Index (SDI) (case study: Lorestan, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, *13*(3), 110. **doi:**10.1007/s12517-020-5059-8

Jeong, M.S., Park, SY., Kim, Y.J., Yoon, H.C., & Lee, J.H. (2024). Identification of propagation characteristics from meteorological drought to hydrological drought using daily drought indices and lagged correlations analysis. *Journal of Hydrology: Regional Studies, 55*, 101939. **doi:**10.1016/j.ejrh.2024.101939

Khosravi, M., & Yazdani, M. (2024). Evaluating the effect of drought on the temporal pattern of groundwater recharge in Damghanroud watershed, 38(1), 146–164. **doi:**10.22092/wmrj.2024.365662.1585 [In Persian]

Khosravi, M., Zolfaghari, AA., Kaboli, SH., & Ghafari, H. (2022). Application of digital soil mapping in soil particle size zonation and estimation of saturated soil hydraulic conductivity for optimal management of watersheds (Case Study: Damghanrood Watershed). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(2), 245–261. **doi:**10.22059/ijswr.2022.333013.669113 [In Persian]

Koch, H., Silva, A.L.C., Liersch, S., de Azevedo, J.R.G., & Hattermann, F.F. (2020). Effects of model calibration on hydrological and water resources management simulations under climate change in a semi-arid watershed. *Climatic Change*, 163(3), 1247–1266. **doi:**10.1007/s10584-020-02917-w

Leelaruban, N., Padmanabhan, G., & Oduor, P. (2017). Examining the relationship between drought indices and groundwater levels. *Water*, 9, 82. **doi:**10.3390/w9020082

Liu, K., Guan, B., Zhai, J., Wang, Q., Zhao, Y., Cao, Y., & Zhang, L. (2025). Characteristics and lag time of meteorological drought propagation to hydrological drought in the Haihe River Basin. 1–25. **doi:**10.3390/su17115134

Luo, S., Tetzlaff, D., Smith, A. & Soulsby, C. (2024). Long-term drought effects on landscape water storage and recovery under contrasting landuses. *Journal of Hydrology*, 636, 131339. **doi:**10.1016/j.jhydrol.2024.131339

Maghrebi, M., Noori, R., Bhattarai, R., Mundher, Yaseen. Z., Tang, Q., Al-Ansari, N., Danandeh Mehr., A., Karbassi, A., Omidvar, J., Farnoush, H., Torabi Haghighi, A., Klove, B., & Madani, K. (2020). Iran's Agriculture in the Anthropocene. *Earth's Future*, 8(9), e2020EF001547. **doi:**10.1029/2020EF001547

McKee, TB., Nolan, J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, California. https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf

Mengistu, AG., Tesfuhuney, WA., Woyessa, YE., Ejigu, AA., & Alemu, MD. (2025). Contrasting hydro-climatic trends and drought dynamics in Ethiopia and South Africa under climate change. *Climate Dynamics*, 63(2), 1–16. **doi:**10.1007/s00382-025-07588-w

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

Mishra, AK., & Singh, VP. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202–216. **doi:**10.1016/j.jhydrol.2010.07.012

Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (2009). Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*, 23(5), 881–897. **doi:**10.1007/s11269-008-9305-1

Nasiri, N., Asghari, K., & Besalatpour, A.A. (2022). Quantitative analysis of the human intervention impacts on hydrological drought in the Zayande-Rud River Basin, *Iran*. *Journal of Water and Climate Change*, 13(9), 3473–3495. http://iwaponline.com/jwcc/article-pdf/13/9/3473/1114721/jwc0133473.pdf

Noori, R., Maghrebi, M., Jessen, S., Bateni, SM., Heggy, E., Javadi, S., Noury, M., Pistre, S., Abolfathi, S., & AghaKouchak, A. (2023). Decline in Iran's groundwater recharge. *Nature Communications*, 14(1), 66–74. **doi:**10.1038/s41467-023-42411-2

Nwayor, IJ. & Robeson, SM. (2024). Exploring the relationship between SPI and SPEI in a warming world. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(4), 2559–2569. **doi:**10.1007/s00704-023-04764-y

Ortiz-Gómez, R., Flowers-Cano, RS., & Medina-García, G. (2022). Sensitivity of the RDI and SPEI drought indices to different models for estimating evapotranspiration potential in semiarid regions. *Water Resources Management*, 36(7), 2471–2492. **doi:**10.1007/s11269-022-03154-9

Pandya, P., Kumarkhaniya, R., Parmar, R., & Ajani, P. (2020). Meteorological drought analysis using standardized precipitation index. *Current World Environment*, 15(3), 477–486. **doi:**10.12944/CWE.15.3.12

Pingale, S.M., Khare, D., Jat, M.K., & Adamowski, J. (2016). Trend analysis of climatic variables in an arid and semi-arid region of the Ajmer District, Rajasthan, India. *Journal of Water and Land Development*, 28(1), 3-18. **doi:**10.1515/jwld-2016-0001

Qaisrani, ZN., Nuthammachot, N., Techato, K., Asadullah, Jatoi, GH., Mahmood, B., & Ahmed, R. (2022). Drought variability assessment using standardized precipitation index, reconnaissance drought index and precipitation deciles across Balochistan, Pakistan. Brazilian *Journal of Biology*, **doi:**10.1590/1519-6984.261001

Riazi, M., Khosravi, K., Samani, MR., Han, S., & Eslamian, S. (2024). Assessing groundwater drought vulnerability through baseflow separation and index-based analysis under climate change projections. *Groundwater for Sustainable Development*, 25, 101179. **doi:**10.1016/j.gsd.2024.101179

Robertson, AW., Baethgen, W., Block, P., Lall, U., Sankarasubramanian, A., De Assis, De F., Filho, S., & Verbist, KMJ. (2014). Climate risk management for water in semi–arid regions. *Earth Perspectives*, 1(1), 1–13. **doi:**10.1186/2194-6434-1-12

Secci, D., Tanda, M.G., Oria, M.D., Todaro, V., & Fagandini, C. (2022). Impacts of climate change on groundwater droughts by means of standardized indices and regional climate models. *Journal of Hydrology*, 603(1), 85–98. **doi:**https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.04444

Sen, P.K. (1968). Estimates of the Regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association, 63(324), 1379-1389. **doi:**10.1080/01621459.1968.10480934*

Shamshirband, S., Hashemi, S., Salimi, H., Samadianfard, S., Asadi, E., Shadkani, S., Kargar, K., Mosavi, A., Nabipour, N. & Chau, KW. (2020). Predicting Standardized Streamflow index for hydrological drought using machine learning models. Engineering *Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14(1), 339–350. **doi:**10.1080/19942060.2020.1715844

Shayeghi, A., Ziveh, AR., Bakhtar, A., Teymoori, J., Hanel, M., Vargas, Godoy. MR., Markonis, Y., & AghaKouchak, A. (2024). Assessing drought impacts on groundwater and agriculture in Iran using high-resolution precipitation and evapotranspiration products. *Journal of Hydrology*, 631, 130828. **doi:**S0022169424002221

Singh, A., Reager, JT. & Behrangi, A. (2021). Estimation of hydrological drought recovery based on precipitation and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) water storage deficit. Hydrology and Earth System Sciences, *Copernicus Publications*, 25(2), 511–526. **doi:**10.5194/hess-25-511-2021

Surendran, U., Anagha, B., Raja, P., Kumar, V., Rajan, K. & Jayakumar, M. (2019). Analysis of drought from humid, semi-arid and arid regions of India using DrinC model with different drought indices. *Water Resources Management*, 33(4), 1521–1540. **doi:**https://doi.org/10.1007/s11269-019-2188-5

Tsakiris, G., Pangalou, D. & Vangelis, H. (2007). Regional Drought assessment based on the reconnaissance drought index (RDI). Water Resources Management: *An International Journal*, 21(5), 821–833. **doi:**10.1007/s11269-006-9105-4

Tsakiris, G. & Vangelis, H. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water Journal*, 9(10), 3-11. https://www.ewra.net/ew/pdf/EW_2005_9-10_01.pdf

Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., & López-Moreno, J.I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718. **doi:**10.1175/2009JCLI2909.1

Vicente-Serrano, SM., & López-Moreno, JI. (2005). Hydrological response to different time scales of climatological drought: An evaluation of the standardized precipitation index in a mountainous Mediterranean basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(5), 523–533

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

Wang, H., Wang, Z., Bai, Y., & Wang, W. (2024). Ecological Informatics Propagation characteristics of meteorological drought to hydrological drought considering nonlinear correlations - A case study of the Hanjiang River Basin, *China*. *Ecological Informatics*, 80, 102512. **doi:**10.1016/j.ecoinf.2024.102512

World Meteorological Organization (WMO), & Global Water Partnership (GWP) (2016). Handbook of Drought Indicators and Indices (M. Svoboda and B.A. Fuchs). Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva..

Worku, MA. (2024). Spatiotemporal analysis of drought severity using SPI and SPEI: case study of semi-arid Borana area, southern Ethiopia. *Frontiers in Environmental Science*. 12, 1337190. **doi:**2024.1337190/full

Xu, K., Yang, D., Xu, X., & Lei, H. (2015). Copula based drought frequency analysis considering the spatio-temporal variability in Southwest China. *Journal of Hydrology*, 527, 630–640. **doi:**10.1016/j.jhydrol.2015.05.030

Xue, R., Luo, J., Zuo, G., & Yang, X. (2024). Dynamic evolution analysis and risk assessment of drought processes: A case study in Shaanxi, *China*. *Ecological Indicators*, 169, 112913. **doi:**10.1016/j.ecolind.2024.112913

Yang, X., Zhang, M., He, X., Ren, L., Pan, M., Yu, X., Wei, Z., & Sheffield, J. (2020). Contrasting Influences of Human Activities on Hydrological Drought Regimes Over China Based on High-Resolution Simulations. Water Resources Research. *Blackwell Publishing Ltd* 56(6):e2019WR025843. **doi:**10.1029/2019WR025843

Zarei, AR., Shabani, A.,, & Moghimi, MM. (2021). Accuracy Assessment of the SPEI, RDI and SPI Drought Indices in Regions of Iran with Different Climate Conditions. *Pure and Applied Geophysics. Birkhauser* 178(4):1387–1403. **doi:**10.1007/s00024-021-02704-3

Zarei, M., Hosseini, SH., & Naemitabar, M. (2023). Assessing vulnerability and population exposed to drought in various climatic regions of northeastern Iran. *Weather, Climate, and Society*, 15(4), 925–941. **doi:** 10.1175/WCAS-D-22-0143.1

Zeleňáková, M., Abd-Elhamid, HF., Soľáková, T., Nagy, P., Asghede, KM., Hlavatá, H., & Purcz, P. (2025). Drought risk assessment in East Slovakia using SPI and RDI at different time scales. *Natural Hazards*. 121(10), 12095–12122. **doi:**10.1007/s11069-025-07274-4

Zhang, L., Zhang, Z., Peng, Z., Xu, Y., Zhang, Y., & Mao, J. (2023a). Linkages between meteorological and hydrological drought in the Jinsha River Basin under a changing environment. *Water*, 15(20), 3644. **doi:**10.3390/w15203644

Zhang, S., Li, J., Zhang, T., Feng, P., & Liu, W. (2024). Response of vegetation to SPI and driving factors in Chinese mainland. *Agricultural Water Management*. *Elsevier* B.V. 291, 108625. **doi:**10.1016/j.agwat.2023.108625

Zhang, X., Hao, Z., Singh, VP., Zhang, Y., Feng, S., Xu, Y., & Hao, F. (2022). Drought propagation under global warming: Characteristics, approaches, processes, and controlling factors. *Science of the Total Environment*. 838, 156021. **doi:**10.1016/j.scitotenv.2022.156021

Zhao, P., Xie, B., Huang, X., & Qu, B. (2022). The dynamic change of propagation from meteorological drought to hydrological drought at the basin scale: A case study from the Weihe River Basin, China. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1054975. **doi:**10.3389/fenvs.2022.1054975

Zuo, DD., Hou, W., Zhang, Q., & Yan, PC. (2022). Sensitivity analysis of standardized precipitation index to climate state selection in China. *Advances in Climate Change Research*, 13(1), 42–50. **doi:**10.1016/j.accre.2021.11.004

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

پیوست

جدول S1- خلاصه کنترل کیفیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در حوضه دامغان

Table S1- Summary of quality control procedures meteorological and hydrometric station in Watershed Damghan

Data type	Station name	Period (Year)	Total records	Missing data (%)	Corrected data (%)	Removed data (%)	Final status	Reason for exclusion
Precipitation	Damghan Synoptic Station	1990–2020	11,232	4.2	2.1	0.8	Accepted	—
Precipitation	Fooladmahaleh Climatological Station	1990–2020	11,232	6.5	3.0	1.2	Accepted	—
Precipitation	Chahardeh Damghan Climatological Station	1990–2020	11,323	8.9	4.1	1.5	Accepted	—
Precipitation	Shahmirzad Synoptic Station	1990–2020	—	>10	—	—	Excluded	More than 10% missing data
Precipitation	Sah Rain Gauge Station	1990–2020	—	<10	—	—	Excluded	Temporal discontinuity
Precipitation	Rudbar Damghan Rain Gauge Station	1990–2020	—	<10	—	—	Excluded	Short data record length
Precipitation	Momenabad Rain Gauge Station	1990–2020	—	<10	—	—	Excluded	Lack of temporal overlap
Precipitation	Damghan Azad University Rain Gauge Station	1990–2020	—	<10	—	—	Excluded	Data recording error
Precipitation	Astaneh Climatological Station	1990–2020	—	<10	—	—	Excluded	Temporal discontinuity
Streamflow	Dam Outlet Hydrometric Station	2008–2018	2,018	7.3	3.5	1.0	Accepted	—
Streamflow	Astaneh Hydrometric Station	2008–2018	—	>10	—	—	Excluded	More than 10% missing data
Streamflow	Labroud Hydrometric Station	2008–2018	—	>10	—	—	Excluded	More than 10% missing data
Streamflow	Sah Hydrometric Station	2008–2018	—	>10	—	—	Excluded	More than 10% missing data

داده‌های اصلاح‌شده شامل مقادیر پرت شناسایی‌شده با آزمون گرابز (سطح اطمینان ۹۵ درصد) و اصلاح‌شده با مقایسه ایستگاه‌های مجاور است. ایستگاه‌هایی که بیش از ۱۰ درصد داده مفقود یا ناپیوستگی زمانی معنادار داشتند، از تحلیل نهایی حذف شدند.

جدول S2- همبستگی با تاخیر زمانی SDI در دوره‌های مختلف (۲۰۰۸–۲۰۱۸)

Table S2- Lagged correlation analysis of the SDI index across different periods (2008–2018)

Time Lag (Months)	Correlation Coefficient (r) – Full Period (SDI, 2008–2018)	p-value	Correlation Coefficient (r) – Overlapping Period (2008–2018)	p-value	Difference (Δr)
0	0.52	>0.001	0.52	>0.001	No change
1	0.61	>0.001	0.6	>0.001	Negligible
2	0.68	>0.001	0.67	>0.001	Negligible
3	0.71	>0.001	0.7	>0.001	Negligible
۴	0.65	>0.001	0.64	>0.001	Negligible
۵	0.55	<0.05	0.54	<0.05	Negligible
۶	0.42	0.05<	0.41	<0.05	Not significant

No significant change (No change), Negligible change (Negligible), Statistically insignificant (Not significant)

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]

جدول S3- مقایسه آمارتوصیفی (مقادیر میانگین و حداقل) شاخص‌های RDI و SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف (دوره ۱۹۹۰-۲۰۲۰)

Table S3- Comparison of descriptive statistics (mean and minimum values) of the RDI and SPEI indices at different timescales (1990–2020)

Time Scale (Months)	Mean RDI	Minimum RDI	Mean SPEI	Minimum SPEI	Correlation Coefficient (r) between RDI and SPEI
1	-0.45	-2.12	-0.42	-2.05	0.92
3	-0.68	-2.61	-0.65	-2.45	0.9
6	-0.82	-2.45	-0.79	-2.45	0.88
12	-1.03	-2.29	-0.98	-2.20	0.87
24	-1.15	-2.06	-1.10	-1.98	0.85

مقادیر بر اساس داده‌های میانگین سه ایستگاه هواشناسی محاسبه شده‌اند. SPEI با روش تورنت وایت برای PET محاسبه شد. همبستگی بالا نشان‌دهنده شباهت کلی دو شاخص است، اما RDI مقادیر منفی شدیدتری نشان می‌دهد که بیانگر حساسیت بیش‌تر به تقاضای تبخیری در منطقه نیمه‌خشک است. مقایسه نشان داد که همبستگی بالایی در اغلب مقیاس‌ها بین RDI و SPEI وجود دارد ($r > 0.85$)، اما RDI خشکسالی‌های شدید را کمی زودتر و شدیدتر شناسایی می‌کند که با شرایط تقاضای تبخیری بالا در حوضه دامغان هم‌خوانی دارد.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1405.14.1.2.9]